

Череповецкое высшее военное инженерное
училище радиоэлектроники

Р.Л. Михайлов

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Монография

Череповец
2016

УДК 623.624
ББК 32.882, 68.517
М15

Печатается по решению ученого совета ЧВВИУРЭ, протокол № 8 от 20 апреля 2016 г.

Рассмотрено на заседании кафедры № 21, протокол № 17 от 04 марта 2016 г.

Рецензенты:

Профессор кафедры Череповецкого высшего военного инженерного училища радиоэлектроники доктор технических наук, профессор Тимофеев Евгений Васильевич

Доцент кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского доктор технических наук, доцент Новиков Евгений Александрович

Михайлов Р.Л.

Помехозащищенность транспортных сетей связи специального назначения. Монография. – Череповец: РИО ЧВВИУРЭ, 2016. – 128 с.: ил.

Данная монография является результатом научной работы автора по обобщению исследований и опыта применения систем связи военного и специального назначения в условиях воздействия средств радиоэлектронной борьбы и подавления. В работе затронуты различные аспекты проблем оценки помехозащищенности транспортных наземно-космических сетей связи, с учетом последних достижений в области средств связи и средств радиоподавления, а также актуальных исследований в области моделирования радиоэлектронного конфликта.

Материал монографии адресован аспирантам и научным работникам, ведущим прикладные исследования в области повышения помехозащищенности систем радиосвязи и оценки эффективности воздействия преднамеренных помех в динамике радиоэлектронного конфликта.

©Михайлов Р.Л., 2016

Научное издание. Напечатано с оригинал-макета, подготовленного автором.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений.....	5
Введение.....	7
1 АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ СВОЕВРЕМЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В ОСССН ОТ УСТОЙЧИВОСТИ НКСС В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ РЭП.....	11
1.1 Структура, технологические решения и перспективы развития КСС.....	11
1.2 Анализ процесса функционирования НКСС в условиях воздействия средств РЭП.....	19
1.2.1 Анализ средств РЭП противника и способов их применения	19
1.2.2 Анализ способов и средств обеспечения устойчивости связи в перспективных НКСС в условиях воздействия средств РЭП	29
1.2.3 Результаты имитационного моделирования	31
1.3 Анализ научно-методического аппарата решения задач маршрутизации в целях обеспечения устойчивости НКСС на сетевом уровне ЭМВОС в условиях воздействия средств РЭП	32
1.3.1 Анализ подходов к оценке устойчивости связи	32
1.3.2 Анализ НМА исследования эффектов от воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС	35
1.3.3 Анализ НМА обеспечения устойчивости сетей связи на сетевом уровне ЭМВОС.....	40
1.4 Постановка научной задачи и частные задачи исследования.....	43
1.4.1 Выбор и обоснование показателя качества и критерия решения научной задачи	43
1.4.2 Рамки исследований.....	47
Выводы по первому разделу.....	48
2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В НКСС.....	50
2.1 Обоснование направлений повышения устойчивости НКСС на сетевом уровне ЭМВОС в условиях воздействия средств РЭП	50
2.2 Модель функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП	56
2.3 Модель функционирования межузлового соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП	74
2.4 Алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП	80
2.5 Алгоритм маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности НКСС.....	84

Выводы по второму разделу.....	90
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ НКСС В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ РЭП И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОСТАВУ СРЕДСТВ НКСС	92
3.1 Моделирование функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП	92
3.2 Моделирование функционирования межузлового соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП	99
3.3 Оценка повышения устойчивости связи при использовании разработанного НМА и формирование граничных условий его применения	104
3.4 Предложения по модификации протокола маршрутизации PNNI в составе стека протоколов АТМ	108
Выводы по третьему разделу.....	113
Заключение.....	115
Список литературы.....	117

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

AAL	– ATM Adaptation Layer;
ACM	– Adaptive Coding and Modulation;
ATM	– Asynchronous Transfer Mode – асинхронный метод передачи;
BGP	– Border Gateway protocol – протокол пограничного шлюза;
CAC	– Connection Admission Control – контроль доступа в сеть;
CSPF	– Constrained Shortest Path First;
DTL	– Designated Transit List – транзитный список;
EFVS	– Electronic Fight Vehicle System – мобильная система радиоэлектронной борьбы;
EIGRP	– Enhanced Interior gateway protocol – усовершенствованный протокол внутреннего шлюза;
GCAC	– Generic Call Admission Control – алгоритм общего контроля доступа в сеть;
IEWCS	– Intelligence and Electronic Warfare Command Sensors – универсальные датчики разведки и радиоэлектронной борьбы;
IGRP	– Interior gateway protocol – протокол внутреннего шлюза;
MCPC	– Multiple Channels per Carrier – несколько каналов на одну несущую;
MPLS	– Multiprotocol label switching – многопротокольная коммутация по меткам;
PDH	– Plesiochronic Digital Hierarchy – плезиохронная цифровая иерархия
PNNI	– Private Network-to-Network Interface – частный интерфейс «сеть – сеть»;
QoS	– Quality of Service – качество обслуживания;
SCPC	– Single Channel per Carrier – один канал на одну несущую;
SDH	– Synchronous Digital Hierarchy – синхронная цифровая иерархия;
STM	– Synchronous Transfer Mode – синхронный режим передачи;
TCP/IP	– Transmission Control Protocol/Internet Protocol – протокол управления передачей/межсетевой протокол;
TDMA	– Time Division Multiple Access – временное разделение абонентов;
АСУ	– автоматизированная система управления;
БПЛА	– беспилотный летательный аппарат;
БРТК	– бортовой ретрансляционный комплекс;
ВМС	– Военно-морские силы;
ВС	– Вооруженные силы;
ВЭ	– воздушный эшелон;

ВЭА	– военно-экономический анализ;
ВЭО	– высокоэллиптическая орбита;
ГСО	– геостационарная орбита;
ДФ	– деструктивный фактор;
ЗПП	– забрасываемый передатчик помех;
ЗС	– земная станция;
ИТ	– информационные технологии;
ИТВ	– информационно-техническое воздействие;
КА	– космический аппарат;
КАС	– космический аппарат связи;
МО	– Министерство обороны;
НКСС	– наземно-космическая сеть связи;
ОСССН	– объединенная система связи специального назначения;
ОСБ	– обработка сигналов на борту;
ОСШП	– отношение сигнала к шуму и помехе;
ППРЧ	– псевдослучайная перестройка рабочей частоты;
ПР	– прямая ретрансляция;
ПУ	– пункт управления;
РЭП	– радиоэлектронное подавление;
САП	– станция активных помех;
СВС	– система военной связи;
СП	– станция помех;
СРС	– средство радиосвязи;
СС	– система связи;
УС	– узел связи;
ФМ-ШПС	– фазомодулированные широкополосные сигналы;
ЭМВОС	– эталонная модель взаимодействия открытых систем;
ЯО	– ядерное оружие.

ВВЕДЕНИЕ

В современной теории военного противоборства все большее значение придается внедрению новых систем управления, основанных на сетевых принципах, при этом основой такой системы управления является подсистема связи. В следствие этого, с одной стороны, системы связи должны соответствовать жестким требованиям системы управления войсками и оружием, с другой стороны – в условиях современного противоборства они сами подвергаются деструктивному воздействию со стороны противника. Основой современного деструктивного воздействия на системы связи (СС) является применение средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и радиоэлектронного подавления (РЭП). Методология оценки воздействия РЭП на СС в настоящее время является достаточно развитой, что актуализирует направления исследований в области обеспечения помехозащиты СС.

В настоящей монографии представлены результаты исследования помехозащищенности транспортных наземно-космических систем связи (НКСС) на сетевом уровне эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). Вопросы функционирования СС на сетевом уровне рассмотрены в работах С.Е. Ададунова, Д. Бертсекаса, В.М. Вишневого, Э.В. Дейкстры, Е.Н. Косякова, С.И. Макаренко, А.И. Назарова, С.Н. Новикова, К.И. Сычева. Методическим аспектам оценивания и повышения устойчивости связи посвящены работы А.В. Боговика, Е.В. Гречишников, А.Г. Додонова, В.В. Игнатова, Е.Е. Исакова, А.Е. Кучерявого, Д.В. Ландэ, В.А. Нетеса, В.Ю. Стекольников, В.К. Попкова, при этом в более узкой области помехозащищенности (радиоэлектронного подавления) исследования проводились П.И. Антоновичем, В.И. Борисовым, В.И. Владимировым, В.М. Зинчуком, Ю.Л. Козирацким, В.Ф. Комаровичем, М.А. Коцыняком, А.И. Куприяновым, В.А. Липатниковым, С.И. Макаренко, А.А. Сиротой, В.Г. Радзиевским, Ю.И. Стародубцевым, А.М. Чудновым. Задача разработки элементов научно-методического аппарата повышения устойчивости связи на сетевом уровне ЭМВОС нашла свое отражение в работах С.И. Бабусенко, А.А. Бурова и А.В. Паршуткина, при этом специфика НКСС, связанная с технологическими решениями в области спутниковой связи, не учитывалась. Выполненное исследование обобщает, дополняет и развивает данные работы отечественных ученых.

Материал работы ориентирован на подготовленного читателя и адресован преподавателям, научным работникам, соискателям ученой степени, ведущим исследования в области совершенствования СС, а также в области поиска новых способов подавления СС в условиях военного и радиоэлектронного противоборства.

В первой главе работы проведен общий анализ способов повышения помехозащищенности транспортных сетей связи специального назначения (ТСССН) в динамике радиоэлектронного конфликта. При этом в качестве

ТСССН рассматривается транспортная наземно-космическая сеть в составе центральных станций спутниковой связи (ЦССС), а также космических аппаратов связи (КАС) на геостационарной орбите (ГСО). Представлен анализ методов повышения помехозащищенности ТСССН и рассмотрены основные способы воздействия средств РЭП. Показано, что способы и средства обеспечения помехозащищенности связи в ТСССН ориентированы на физический (ППРЧ, система автоматического регулирования выходной мощности передатчиков) и канальный (помехоустойчивое кодирование) уровни ЭМВОС, в то время как на сетевом уровне, в достаточно отдаленной перспективе, предполагается лишь организация автоматической повторной передачи пакетов в случае их потери. Проведен анализ подходов к оцениванию помехозащищенности ТСССН согласно с требованиями соответствующих руководящих документов и исследований других авторов. На основе данного анализа предложен показатель помехозащищенности СС – вероятность своевременной доставки пакета $P_{сд}$.

Во второй главе работы представлены следующие элементы научно-методического аппарата, описывающие и позволяющие повысить помехозащищенность ТСССН.

1. Модель функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП, отличающаяся от известных возможностью оценки параметров каналов связи (КС) сетевого уровня ЭМВОС как результата преднамеренных воздействий средств РЭП, с учетом схем адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования.

2. Модель функционирования межузлового соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП, содержащая оригинальный переход от соотношения временных интервалов сигнализации к вероятностным параметрам марковской модели, позволяющий получить аналитические выражения для зависимости вероятности нахождения межузлового соединения НКСС в работоспособном состоянии от значений временных интервалов сигнализации.

3. Алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП, основанный на использовании оригинальной модели функционирования межузлового соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП для обоснования временных параметров сигнализации при заданных условиях воздействия средств РЭП. Применение данного алгоритма обеспечивает более адекватную диагностику факта подавления КС на сетевом уровне ЭМВОС, что позволяет повысить устойчивость НКСС путем динамического изменения временных интервалов сигнализации исходя из оценки интенсивности воздействия средств РЭП.

4. Алгоритм маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности НКСС, отличающийся от используемого в распространенных протоколах маршрутизации алгоритма Дейкстры новыми функциональными элементами,

обеспечивающими возможность поиска в структуре НКСС резервных путей одновременно с ведением поиска кратчайших путей, что позволяет снизить время реконфигурации путей в НКСС, вызванное подавлением КС НКСС средствами РЭП.

В третьей главе проведен анализ изменения целевых показателей помехозащищенности в зависимости от значения среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$. Уменьшение значения вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$ в случае, если не используются разработанные алгоритмы, приводит к снижению вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}$, а в случае, если используются разработанные алгоритмы – к повышению минимального значения времени диагностики отказа ИНС $T_{\text{диагн}}$, при котором обеспечивается заданное значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}^{\text{зад}}$. Использование разработанных алгоритмов позволяет обеспечить заданное значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}^{\text{зад}} = 0,9 \mid T_{\text{дост}}^{\text{зад}} = 3 \text{ с}$ при значениях среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}} > 1,2 \text{ с}$, при этом эффективность их использования $E_{\text{у}}$ при $T_{\text{отк КС}} = 1,2 \dots 600 \text{ с}$ достигает 80 %, что позволяет сделать вывод о достижении цели исследования.

Автор выражает благодарность доктору технических наук профессору Е.В. Тимофееву и доктору технических наук доценту Е.А. Новикову за кропотливый труд по поиску ошибок и неточностей при рецензировании монографии.

Данная работа стала возможной благодаря помощи и критике людей, которые всячески поддерживали авторов в их исследованиях интересных и важных вопросов теории систем связи и радиоэлектронной борьбы. Автор выражает глубокую признательность заслуженному деятелю науки РФ доктору технических наук профессору Г.Н. Мальцеву, доктору технических наук профессору К.Ю. Цветкову, кандидату технических наук доценту Макаренко С.И. Именно они способствовали становлению автора как ученого, и я горжусь, что имел возможность обучаться у таких людей и работать рядом с ними.

Большую признательность хочется выразить коллективам кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского и кафедры тактико-специальной подготовки Череповецкого высшего военного инженерного училища радиоэлектроники, где автору посчастливилось проходить службу. Их творческая атмосфера способствовала плодотворной деятельности и определила области научных интересов и направления исследований автора.

Большое спасибо за общение, критику и поддержку в научной работе моему главному вдохновителю – Ю.С. Михайловой, а также доктору технических наук профессору П.А. Будко, кандидату технических наук доценту С.А. Якушенко, доктору технических наук профессору В.С. Гончаревскому, доктору технических наук профессору А.С. Попову, доктору технических наук профессору И.Б. Паращуку, доктору технических наук профессору И.Ю. Еремееву, доктору технических наук доценту А.В. Паршуткину, докто-

ру технических наук доценту Е.А. Новикову, кандидату технических наук доценту Е.Н. Косякову, кандидату технических наук доценту В.Е. Федосееву, кандидату технических наук доценту И.Т. Осташову, кандидату технических наук А.В. Кожякову, кандидату технических наук доценту С.Н. Ефимову, кандидату технических наук доценту А.Ф. Акмоллову, кандидату технических наук В.М. Коровину, кандидату технических наук Е.А. Викторову, кандидату технических наук Е.С. Абазиной, кандидату технических наук А.А. Ковальскому, кандидату технических наук А.Р. Павлову, К.В. Ушаневу, С.Х. Зиннурову, А.В. Ефремову, С.М. Приходько, В.В. Гапонову, Е.А. Астахову, В.Ф. Волковскому.

Считаю своим долгом искренне поблагодарить А.В. Бабича и весь коллектив возглавляемого им редакционно-издательского отдела Череповецкого высшего военного инженерного училища радиоэлектроники без помощи и участия которых монография не смогла бы выйти в свет.

Автор будет рад сотрудничеству в рассматриваемой области исследований, а также конструктивным замечаниям и предложениям по содержанию монографии которые можно направлять по адресу: mikhailov-rom2012@yandex.ru.

Р. Л. Михайлов

1 АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ СВОЕВРЕМЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В ОСССН ОТ УСТОЙЧИВОСТИ ТСС В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ РЭП

1.1 Структура, технологические решения и перспективы развития ТСС

На современном этапе формирования Вооруженных сил (ВС) наиболее развитых в военном отношении стран определены основные задачи и направления совершенствования системы военной связи [1–4]. Согласно [5, 6–8], основу системы связи (СС), позволяющей удовлетворить современным требованиям системы управления войсками и оружием, в части обеспечения услуг и выполнения требований по информационной безопасности, помехо- и разведзащищенности, должна составлять перспективная объединенная система связи специального назначения (ОСССН).

Под ОСССН в монографии понимается совокупность автоматизированных цифровых сетей связи специального назначения наземного, морского, воздушного и космического базирования, построенных на основе унифицированных телекоммуникационных технологий, объединенных единым управлением и комплексной информационной безопасностью и обеспечивающих предоставление пользователям требуемых услуг заданного качества [1].

Интеграция услуг и переход к сетевым (сетевым) принципам является на сегодняшний день одним из приоритетных аспектов совершенствования СС, который позволяет существенным образом повысить ее устойчивость при сокращении необходимого для организации связи количества направлений (каналов) связи и номенклатуры реализующего их телекоммуникационного оборудования, включая средства связи и защиты информации. В связи с этим принципиальным отличием ОСССН от СС предыдущего поколения является то, что она представляет собой совокупность функционально и технически взаимосвязанных цифровых СС, построенных на основе современных телекоммуникационных технологий, объединенных единым безопасным информационным пространством и управлением, обеспечивающих предоставление пользователям современных услуг связи заданного качества.

Каждый элемент телекоммуникационной инфраструктуры ОСССН развивается на своих технологических принципах и решениях, которые определяются в [1]. Создание ОСССН обеспечивается путем решения следующих основных задач [1, 5, 9]:

- интеграция информационно-телекоммуникационных систем (средств), огневого поражения, разведки, радиоэлектронной борьбы, навигации и связи;
- создание единой технологической основы построения стационарно-полевой транспортной сети ОСССН, включающей магистральные, региональные, гарнизонные, транзитные узлы связи, стационарные и полевые узлы связи пунктов управления;
- создание программно-аппаратных комплексов по предоставлению должностным лицам органов военного управления информационно-телеком-

муникационных услуг на основе интеграции перспективных систем и комплексов телекоммуникаций, единой транспортной среды, применения современных управленческих, технологических и технических решений;

- создание единой автоматизированной системы управления СС, выполняющей функции мониторинга состояния элементов СС;
- создание подсистемы информационной безопасности СС;
- создание единой системы технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления (АСУ), входящей в состав унифицированной сопряженной системы технического и тылового обеспечения;
- обеспечение информационно-технологической совместимости разрабатываемых систем, комплексов и средств связи;
- обеспечение планирования и контроля использования выделяемых ресурсов на развитие и эксплуатацию СС;
- создание правовой и материальной основы системы.

Согласно [5, 9, 10, 11], ОСССН состоит из эшелонов, под которыми понимается совокупность телекоммуникационных средств и комплексов, размещенных, как правило, в одной однородной пространственной среде (космической, воздушной, морской, наземной), соединенных между собой в единую сеть, предназначенную для обеспечения потребностей в услугах пользователей находящихся на объектах как в данной среде, так и вне ее. Обобщенная структура ОСССН представлена на рис. 1.1.

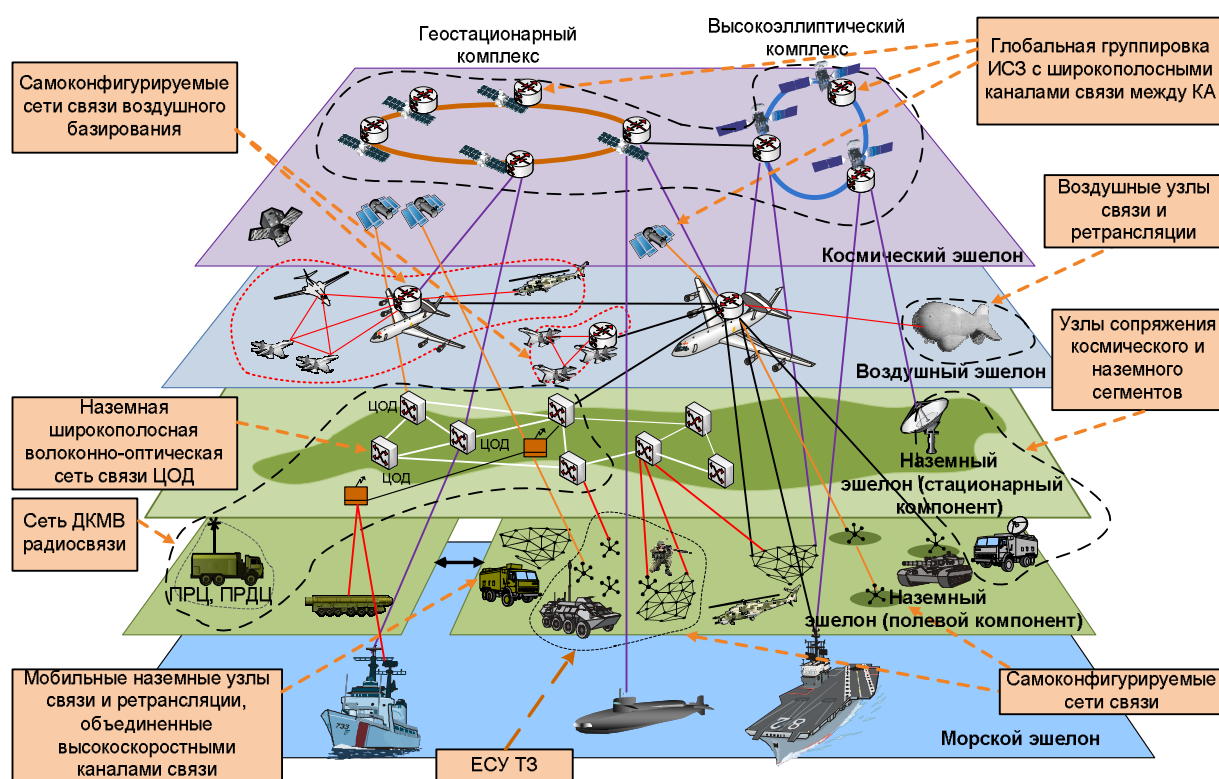


Рис. 1.1 – Обобщенная структура ОСССН

Наземный эшелон ОСССН включает в себя стационарную и полевую компоненты и создается с использованием сетевых ориентированных, унифици-

рованных системно-технических и программно-аппаратных решений с заданной номенклатурой типовых каналов связи и трактов передачи в соответствии с нормами военных стандартов [10].

Наземный эшелон является взаимоувязанной совокупностью стационарных и подвижных (полевых) узлов и линий различных родов связи. Он представляет собой организационно-техническое объединение средств и комплексов связи, развернутых по единому замыслу (на территории) в зонах действий группировок войск (сил) в театре военных действий, армий и других воинских формирований, выполняющих задачи по образованию, маршрутизации и коммутации каналов и трактов в интересах управления войсками. Данные узлы и линии связи функционируют по единому замыслу и плану при решении задач обеспечения управления ВС в мирное и военное время, в различных условиях военно-политической обстановки и обеспечивают взаимодействие с техническими средствами других эшелонов.

Стационарная и полевая компоненты наземного эшелона ОСССН предназначены для организации коммуникационных ресурсов и информационных услуг требуемого объема и качества [10].

Стационарная и полевая компоненты наземного эшелона ОСССН включают взаимоувязанные линиями различных родов связи узлы и комплексы средств связи стационарных и подвижных объектов ВС, обеспечивающие образование функциональных сетей (систем): транспортной сети, сетей доступа, объектовых сетей, сетей связи с подвижными объектами.

Воздушный эшелон (ВЭ) ОСССН строится на основе средств воздушно-наземной связи и ретрансляторов связи на летно-подъемных средствах различного назначения.

ВЭ включает в себя средства и комплексы связи, размещенные с использованием [5]:

- летно-подъемных средств высшего политического и военного руководства;
- летно-подъемных средств воздушных командных пунктов;
- летно-подъемных средств видов и родов войск (в том числе на беспилотных летательных аппаратах);
- высокоподнятых ретрансляторов связи.

В состав ВЭ ОСССН входят наземная и воздушная компоненты, а также АСУ связью и элементами наземного и воздушного базирования.

К воздушной компоненте относятся транспортная сеть, включая бортовые комплексы связи, которыми оснащаются ретрансляторы транспортной сети ВЭ, а также воздушные пункты управления, летательные аппараты дальней, военно-транспортной, фронтовой, армейской авиации, авиации Военно-морских сил (ВМС) и др., т.е. объекты, которые используют ресурсы ВЭ ОСССН, но не входят в его состав.

К наземной компоненте ВЭ относятся наземные комплексы воздушной связи, размещаемые на наземных узлах связи, стационарных и подвижных, средства сопряжения с транспортной сетью наземного эшелона, т.е. наземная

компонента ВЭ будет использоваться для организации линий привязки к наземным пунктам привязки и транспортной сети, а также линий прямых связей с узлами связи пунктов управления (ПУ).

Технической основой воздушного эшелона взаимоувязанной телекоммуникационной инфраструктуры ОСССН является транспортная сеть воздушного базирования, построенная с использованием ретрансляторов связи, средств телекоммуникации и ретрансляции воздушного базирования.

Морской эшелон ОСССН представляет из себя организационно-техническое объединение основных системообразующих элементов: стационарно-мобильных узлов связи, радиоцентров, радиостанций, автоматизированных комплексов связи подводных лодок, надводных кораблей, летательных аппаратов, соединенных линиями различных родов связи [10]. Для организации радиосвязи используются различные диапазоны радиоволн, а также каналы спутниковой связи. Для организации магистральных линий связи используются, в том числе, арендованные в гражданских сетях электросвязи (региональных операторов) каналы связи.

Возможности СС ВМС определяют основные системообразующие элементы [10]:

- стационарные узлы связи объединений ВМС (как части постоянной готовности);

- полевые подвижные узлы, радиоцентры и радиостанции, станции спутниковой связи;

- автоматизированные комплексы связи подводных лодок, надводных кораблей, летательных аппаратов;

- линии различных родов связи.

Морской эшелон имеет в своем составе морской и наземный (сухопутный) компоненты. Наземный (сухопутный) компонент включает [10]:

- узлы связи (УС) ПУ ВМС;

- транспортную сеть связи;

- сети радиосвязи, спутниковой связи и навигации;

- центры управления дальней оперативной связи ВМС;

- ближней оперативно-тактической связи;

- систему ближней тактической связи.

Морской компонент, как правило, состоит из средств связи и автоматизации, размещаемых на подводных лодках, надводных кораблях, а для ретрансляции сигналов используются самолеты-ретрансляторы. Морской эшелон используется совместно с наземным эшелонам, ВЭ и космическим эшелонам ОСССН.

Космический эшелон ОСССН создается на основе средств земных станций спутниковой связи и ретрансляторов связи на космических аппаратах (КА).

Применяемые в космическом эшелоне ОСССН технологии обеспечивают интеграцию различных видов трафика, устойчивое взаимодействие комплексов программно-аппаратных средств, на стационарных, полевых и подвижных узлах связи различных звеньев управления и носителях оружия

полевого, воздушного и морского эшелонов с целью обеспечения возможности обмена всеми видами информации между всеми абонентами ОСССН во всех эшелонах.

Структура космического эшелона ОСССН будет когерентной по отношению к структуре системы управления ВС. Система будет строиться независимо от изменения системы ПУ и в то же время согласованно по времени (с опережением) и месту их развертывания, с учетом обеспечения максимально удобных условий привязки.

Передачу информации в сетях связи, которые будут задействовать ресурс КЭ, предполагается осуществить с применением технологий коммутации пакетов [12, 13, 14]. Использование коммутации пакетов позволяет обеспечить качество обслуживания абонентов в соответствии с заданными значениями. Использование пакетного режима работы делает возможным организацию прозрачного взаимодействия космического эшелона связи с другими эшелонами ОСССН в соответствии с технологиями ATM, TCP/IP.

Перспективная система построения спутников-ретрансляторов в составе космического эшелона предполагает два режима работы [12, 13, 14]:

- прямая ретрансляция (каналы запроса ресурсов функционируют в соответствии с протоколами на основе S-ALOHA, P-ALOHA, R-ALOHA; каналы передачи данных – в режиме ретрансляции потоков PDH);

- передача сигналов с обработкой на борту (в этом случае возможна организация персонального обслуживания абонентов в соответствии с требованиями к качеству обслуживания по протоколу ATM, с маршрутизацией информационных потоков по протоколу MPLS).

Особенностью построения космического эшелона ОСССН является необходимость возложить на него как функции части транспортной сети, соединяющей пространственно разнесенные части ОСССН, так и обслуживание персональных вызовов абонентов. С учетом данной особенности структура перспективной транспортной сети ОСССН будет иметь вид, представленный на рис. 1.2. В дальнейшем под транспортной сетью связи специального назначения (ТСССН) в монографии будет пониматься транспортная наземно-космическая сеть ОСССН в составе трех центральных станций спутниковой связи (ЦССС), а также космических аппаратов связи (КАС) на геостационарной орбите (ГСО), как это показано на рис. 1.2.

С точки зрения организации транспортной сети, ЦССС будут являться граничными маршрутизаторами, через которые корреспонденты получают доступ к ее ресурсам. Для многофункциональной бортовой цифровой платформы (МБЦП) КАС транспортная наземно-космическая сеть ОСССН будет являться одной из сетей, функционирующей посредством ресурса КАС. Частотно-временной ресурс (ЧВР) выделяемый для НКСС будет выделяться исходя из заявки соответствующих органов военного управления и с учетом обеспечения ресурсом других сетей связи.

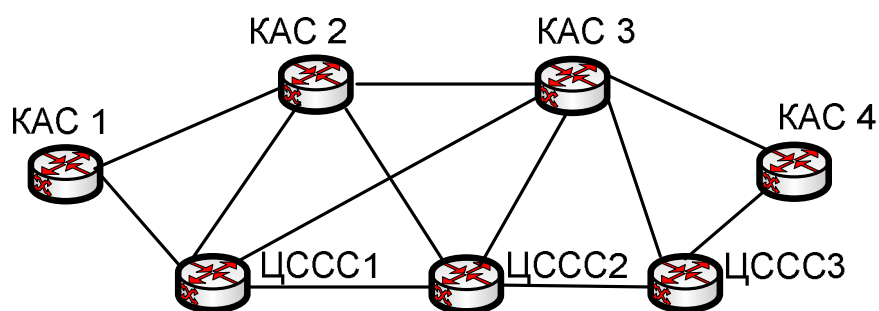


Рис. 1.2 – Транспортная наземно-космическая сеть ОСССН

Предполагается, что ресурс КЭ ОСССН будут использовать следующие СС:

- сети передачи специальных сигналов, помехозащищенные;
- сети связи средств предыдущего поколения с обработкой сигналов на борту (ОСБ) диапазонов С (4/6 ГГц), Х (7/8 ГГц), Р (0,2/0,4 ГГц) и с прямой ретрансляцией (ПР) диапазонов С (4/6 ГГц), Х (7/8 ГГц), Р (0,2/0,4 ГГц);
- перспективные сети связи диапазона Х (7/8 ГГц) с ОСБ высокоскоростных сигналов 64–2048 (8448) кбит/с;
- сети персональной связи диапазона 20/44 ГГц с ОСБ низкоскоростных сигналов 2,4–9,6 кбит/с, с режимом радио-АТС с зональным обслуживанием, помехозащищенные;
- сети связи диапазона 20/44 ГГц с ОСБ высокоскоростных сигналов 64–2048 кбит/с, с зональным обслуживанием, помехозащищенные;
- сети персональной связи диапазона 0,2/0,4 ГГц с ОСБ низкоскоростных сигналов 2,4–9,6 (64) кбит/с, с кодовым уплотнением;
- сети связи с погруженными подводными лодками верхней части диапазона 0,2/0,4 ГГц с ОСБ низкоскоростных сигналов 0,2–4,8 кбит/с.

Для сетей персональной спутниковой связи в диапазоне 0,2/0,4 ГГц используется технология широкополосного доступа с кодовым разделением сигналов WCDMA (с $F_T = 2,4$ МГц).

Стыковка спутниковых каналов перспективных СС с ОСССН должна обеспечиваться на канальном уровне на скоростях 1,2 – 8448 кбит/с.

При реализации пакетной коммутации на борту КАС предполагается, что должен коммутироваться канал (групповой сигнал от станции) целиком, а не разбиваться на пакеты и направляться по разным маршрутам. За базовую последовательность при цифровой обработке, уплотнении-разуплотнении взята последовательность 1500 бит/с (ряд обрабатываемых скоростей должен складываться исходя из кратности к 1500 бит/с).

Перспективные бортовые ретрансляторы КАС будут разрабатываться на основе гибкой реконфигурации бортовых цифровых платформ в части алгоритмов приема и методов цифровой обработки сигналов на линиях «вверх», коммутации сигнально-информационных потоков, уплотнения и формирования ретранслируемых сигналов на линиях «КАС-ЦССС». Структурная схема ретранслятора с ОСБ приведена на рис. 1.3. В качестве борто-

вого блока коммутации пакетов и каналов наиболее приемлемым является специальный многопротокольный АТМ-коммутатор, позволяющий реализовать любые функции как коммутации пакетов, в том числе MPLS/IP, так и функции коммутатора каналов и цифровых потоков с использованием быстрого преобразования Фурье [15]. Схема реализации ОСБ, применяемая к цифровым потокам, ретранслируемым через КАС, приведена на рис. 1.4.



Рис. 1.3 – Схема бортового ретранслятора с ОСБ

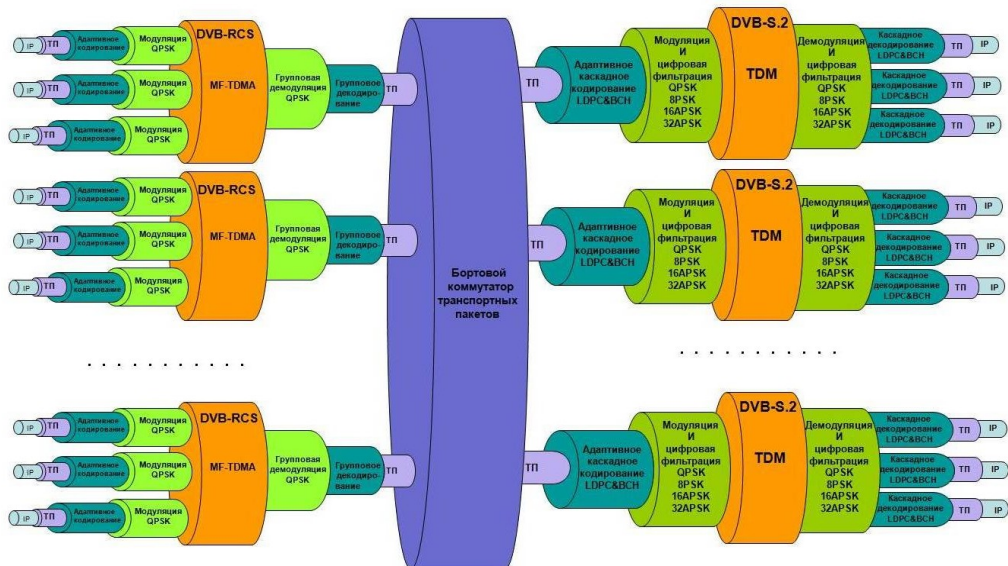


Рис. 1.4 – Схема реализации ОСБ

В технологии АТМ используются небольшие пакеты фиксированной длины (ячейки), имеющие длину 53 байта, из которых 48 байт отводятся под данные, а 5 байт занимает заголовок. Технология АТМ является ориентированной на соединение. Виртуальное соединение устанавливается между узлами сети каждый раз при необходимости передачи информации. Каждому виртуальному соединению назначаются идентификатор виртуального пути и идентификатор виртуального канала. Каждый виртуальный путь включает один или несколько виртуальных каналов. Для согласования уровней модели АТМ с уровнями эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС) вводят: физический уровень технологии АТМ; уровень АТМ; уровень адаптации АТМ (AAL – АТМ Adaptation Layer).

В зависимости от вида передаваемой информации и требуемого QoS в технологии АТМ определяется тип уровня ААL (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Характеристика типов уровней адаптации АТМ [16]

Характеристика вида информации	Тип 1	Тип 2	Тип 3/4	Тип 5
		видео и телефония с постоянной скоростью	видео и телефония с переменной скоростью	интерактивная передача данных; факс; ЛВС
Временная связь источник-получатель	Требуется		Не требуется	
Скорость передачи	Постоянная		Изменяющаяся	
Режим соединения	С установлением соединения		Без установления соединения	

В настоящее время в МБЦП КАС и ЦССС будет реализован уровень адаптации AAL5, но в дальнейшем при программной модификации алгоритмического обеспечения МБЦП КАС и ЦССС планируется повышение их функциональности путем дополнения возможностью поддержки уровней адаптации AAL1 ... AAL3/4.

Качество обслуживания соответствующего типа данных регламентируется рекомендациями международных организаций по стандартизации: ITU-T (серия Y.2xx), ETSI (NGNR.1, R.2), 3GPP/IETF (концепция IMS, R.5-R.7). Численные значения показателей качества обслуживания при передаче трафика различного типа приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Допустимые значения параметров качества обслуживания при передаче мультимедийного трафика [16]

Тип сервиса	Параметры качества обслуживания				
	Время установления соединения, с	Вероятность разрыва соединения	Задержка, мс	Джиттер, мс	Вероятность потери данных
IP-телефония	0,5–1	10^{-3}	25–500	100–150	10^{-3}
Видеоконференция	0,5–1	10^{-3}	30	30–100	10^{-3}
Цифровое видео по запросу	0,5–1	10^{-3}	30	30–100	10^{-3}
Передача данных	0,5–1	10^{-6}	50–1000	–	10^{-6}
Телевизионное вещание	0,5–1	10^{-8}	1000	–	10^{-8}

Для сигнализации и маршрутизации в АТМ-сетях используется протокол PNNI (Private Network-to-Network Interface). Протокол PNNI базируется на маршрутизации от источника. При этом коммутатор, ближайший к отправителю, вычисляет маршрут через АТМ-сеть до коммутатора, ближайшего к получателю, который объявил о доступности адреса получателя. Для маршрутизации от источника входной коммутатор создает список промежуточных

коммутаторов в пути следования запроса, называемый транзитным списком DTL (Designated Transit List). Для определения каналов связи в сети, которые могут предоставить требуемое качество обслуживания, используется алгоритм общего контроля доступа в сеть (GCAC – Generic Call Admission Control). В соответствии с этим алгоритмом, при вычислении маршрута учитываются только те каналы, которые прошли проверку и обеспечивают заданный уровень качества обслуживания. При передаче информации каждый узел, указанный в DTL, выполняет функции контроля доступа в сеть CAC (Connection Admission Control), так как его состояние могло измениться со времени, когда он передавал данные о наличии имеющихся у него ресурсов остальным узлам сети. В случае если узел не может обеспечить запрашиваемое качество обслуживания, задействуется специальный механизм блокирования (Crankback), в результате которого запрос на соединение возвращается к узлу, создавшему список DTL, и производится попытка рассчитать новый маршрут к узлу назначения, с использованием новых данных о состоянии ресурсов сети. Данный процесс может повторяться несколько раз перед тем, как соединение будет окончательно установлено [17].

В рамках создаваемой в настоящее время ОСССН ведется разработка КЭ в составе орбитальной группировки и земных станций, которая по своим возможностям и характеристикам должна соответствовать современным требованиям по управлению войсками при новой структуре управления. При этом КАС на ГСО будут интегрированы в состав транспортной наземно-космической сети ОСССН и при передаче информационного трафика будет использоваться технология пакетной передачи данных АТМ. Таким образом, актуальным является исследование вопросов повышения устойчивости перспективной транспортной наземно-космической сети ОСССН путем совершенствования протокола маршрутизации PNNI, входящего в стек протоколов АТМ.

1.2 Анализ процесса функционирования НКСС в условиях воздействия средств РЭП

1.2.1 Анализ средств радиоэлектронного подавления противника и способов их применения

Наземно-космическим сетям связи присущ ряд специфических особенностей, которые делают их уязвимыми к воздействию средств радиоэлектронного подавления (РЭП) [18–20].

Во-первых, значительная удаленность КАС от поверхности Земли делает уязвимыми приемные устройства бортовых ретрансляционных комплексов КАС и аппаратуры командных радиолиний управлений КАС от источников помех, располагаемых как в зоне военных конфликтов, так и за их пределами, на территориях неофициально участвующих в конфликте стран. Наличие в этих странах как специализированных комплексов РЭП, так и значи-

тельного числа коммерческих, государственных и военных станций спутниковой связи, работающих в тех же диапазонах частот, что и отечественные станции, позволяет осуществлять постановку помех средствам спутниковой связи ВС и других государственных (силовых) структур в наиболее ответственные моменты боевых действий или кризисных ситуациях. В частности, зоной радиовидимости, из пределов которой могут воздействовать наземные средства РЭП КАС на ГСО, является практически 1/3 поверхности Земли [19].

Во-вторых, большая удаленность КАС на ГСО от поверхности Земли и ограниченные ресурсы массы и энергопотребления, выделяемые для передающих устройств МБЦП, обуславливают малые уровни плотности потока мощности информационных сигналов, излучаемых спутниками связи у поверхности Земли. Данное обстоятельство обуславливает возможность эффективного подавления непохозащищенных линий спутниковой связи путем постановки помех по входу приемных устройств ЗС наземно-космической сети связи. Возможные варианты постановки помех по входу ЗС и КАС представлены на рис. 1.5 [19].

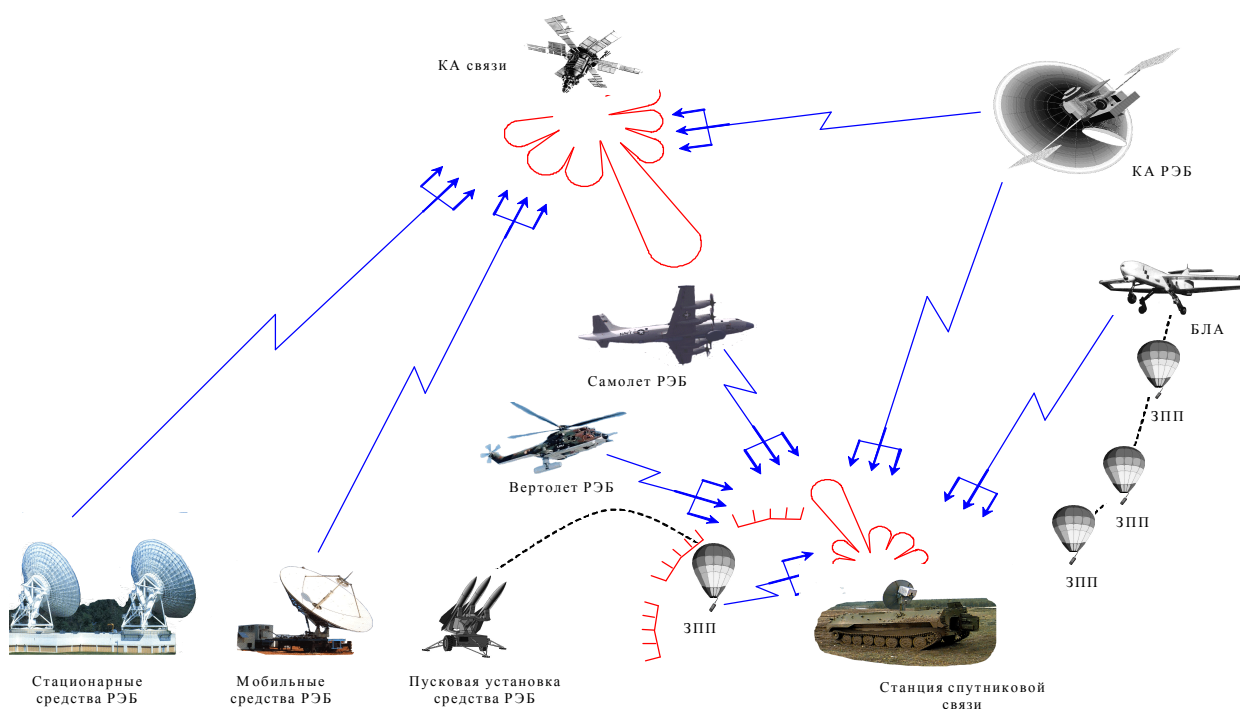


Рис. 1.5 – Варианты постановки помех по входу ЗС и КАС

В-третьих, необходимость реализации в наземно-космической сети связи практически глобальной зоны обслуживания при обеспечении возможности концентрации ресурсов пропускной способности в пределах ограниченных по размеру регионов на поверхности Земли, соответствующих оперативным направлениям ведения боевых действия ВС, за счет изменения ориентации в пространстве перенацеливаемых остроуправляемых антенн КАС, а также орбитального маневра самих КАС [19].

В-четвертых, значительные размеры зоны радиовидимости КАС, а также наличие у целого ряда государств как специализированных спутниковых станций РЭП, так и гражданских станций управления КА позволяют противоборствующей стороне или ее неофициально участвующим в конфликте союзникам осуществлять попытки введения ложной информации в аппаратуру командных радиолиний управления КАС [19].

Наиболее вероятными средствами подавления по входу ретранслятора следует считать [19]:

- специализированные стационарные и мобильные станции помех (СП) наземного и морского базирования;

- станции военных и коммерческих систем спутниковой связи (стационарные, мобильные наземные, корабельные), дооборудованные приставками формирования помех;

- средства РЭП, размещенные на КА.

Наиболее вероятными средствами подавления по входу земных станций следует считать [19]:

- самолетные (вертолетные) средства комплекса РЭП из состава частей и подразделений разведки и радиоэлектронной борьбы, развернутых в театре военных действий;

- СП, устанавливаемые на самолетах стратегической авиации;

- СП, устанавливаемые на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) РЭП;

- забрасываемые передатчики помех (ЗПП).

Стационарные специализированные средства РЭП могут осуществлять подавление КАС только в промежутки времени от начала боевых действий до момента их поражения при огневом воздействии.

Вероятность выживания специализированных стационарных средств РЭП в условиях ведения боевых действий составит:

- 0,7 – к 40 мин боевых действий;

- 0,6 – к 90 мин боевых действий;

- 0,5 – к 300 мин боевых действий.

На вооружении сухопутных войск США имеются технические средства разведки и постановки помех космической связи [21–23]:

- комплекс радиоразведки и радиоподавления AN/ULQ-11 «Сеферм Лидер»;

- автоматизированный комплекс радиоразведки радио- и радиорелейной связи «Лефокс Грей».

Данные по разрабатываемым и перспективным разработкам стационарных средств РЭП для систем спутниковой связи представлены в табл. 1.3 [19].

Помимо стационарных средств могут быть использованы мобильные специализированные средства РЭП. Общее количество мобильных средств РЭП к 2011 г. могло достигнуть 50–65 единиц. Вероятность применения данных средств РЭП в условиях боевых действий очень велика.

Таблица 1.3 – Стационарные станции помех системам спутниковой связи

Характеристики	Разрабатываемые	Перспективные
Полосы рабочих частот, ГГц	0,2–0,6; 1–2; 3,4–8,4; 10–14; 20–40	0,2–0,6; 1–2; 3–9; 10–14; 20–100
Мощность одного передатчика (непр.), кВт	10–20; 50–100; 10–100; до 200	10–20; 50–100; 10–100; до 200
Диаметр передающей антенны, м	8–32	8–32
Коэффициент усиления антенны, дБ	27–34; 40–44; 60–65; 63–67; 67–69	27–34; 40–44; 60–65; 63–67; 67–69
Максимальная эквивалентная изотропно-излучаемая мощность, дБВт	77; 94; 115; 117; 122	77; 94; 115; 117; 122
Количество передатчиков помех	5–10	5–10
Добротность приемной системы, дБ/град.К (в поддиапазонах)	10–20; 26–33; 38–45; 46–48; 48–52	10–20; 26–33; 38–45; 46–48; 48–52
Время анализа сигналов, с	0,001–0,1	0,001–0,1
Время реакции станции помех, с	0,25–1	0,25–0,5
Динамический диапазон, дБ	60–80	60–90
Ширина полосы обзора одним приемником, ГГц	0,01–2	0,01–2
Основные виды помех	Квазигармонические; шумовые; хаотические; импульсные; ретранслированные; структурные (имитационные); многочастотные; дезинформирующие	Квазигармонические; шумовые; хаотические; импульсные; ретранслированные; структурные (имитационные); многочастотные; дезинформирующие

Вероятность выживания специализированных мобильных средств РЭП в условиях ведения боевых действий составит:

- 0,8 – к 40 мин боевых действий;
- 0,7 – к 90 мин боевых действий;
- 0,6 – к 300 мин боевых действий.

В настоящее время на вооружении сухопутных войск ВС США находится мобильная система радиоэлектронной борьбы EFVS (Electronic Fight Vehicle System). Система EFVS была разработана фирмой «FMC» (США) и установлена на гусеничном бронетранспортере. В этой системе используется часть комплекса универсальных датчиков разведки и РЭБ IEWCS (Intelligence and Electronic Warfare Command Sensors), созданного для обеспечения радиоэлектронной поддержки, радио- и радиоэлектронной разведки, радиопеленгования и измерения разницы времени прихода сигнала и разни-

цы доплеровских частот. Изменение времени прихода сигнала и разницы доплеровских частот используется для пеленгации источников связанных сигналов, при этом применяется четырехэлементная антенна. В комплекс датчиков IEWCS входят три системы с общими радиоэлектронными модулями [24]:

1) универсальный датчик наземного базирования для «тяжелых» дивизий, в качестве которого будет использоваться система EFVS;

2) универсальный датчик наземного базирования для «легких» дивизий GBCS-L, размещенный на многоцелевой колесной машине высокой проходимости;

3) усовершенствованная система радиотехнической разведки AN/ALQ-151 «Advanced Quickfix», устанавливаемая на вертолете EH-60 фирмы «Sikorsky» или на самолете.

Системами EFVS и AN/ALQ-151 оснащены бронетанковые и механизированные дивизии. Воздушно-десантные и «легкие» дивизии оснащены системами и AN/ALQ-151. В состав системы EFVS входит оборудование объединенной системы распределения тактической информации, скрытных систем передачи больших объемов информации в речевой форме и данных усовершенствованной системы определения местоположения войсковых объектов [24].

Данные по разрабатываемым и перспективным разработкам мобильных средств РЭП для систем спутников связи представлены в табл. 1.4 [19].

Таблица 1.4 – Мобильные станции помех космической связи

Характеристики	Разрабатываемые	Перспективные
Полосы рабочих частот, ГГц	0,2–2; 3,4–8,4; 10–14; 20–40	0,2–2; 3–9; 10–14; 20–100
Мощность одного передатчика (непр.), кВт	2–3; 1–2; 0,5–1	2–3; 1–2; 0,5–1
Диаметр передающей антенны, м	1,5–5 (до 7)	1,5–7
Максимальная эквивалентная изотропно-излучаемая мощность, дБВт	43–64; 76–83; 82–83; 83–89 (до 93)	43–64; 76–83; 82–83; 83–89 (до 93)
Количество передатчиков помех	3–5	3–6
Добротность приемной системы, дБ/град.К (в поддиапазонах)	(–6)–15; 21–27; 28–31; 30–35	(–6)–15; 21–27; 28–31; 30–35
Время анализа сигналов, с	0,001–0,1	0,001–0,1
Время реакции станции помех, с	0,25–1	0,25–0,5
Динамический диапазон, дБ	50–80	50–90
Ширина полосы обзора одним приемником, ГГц	0,01–2	0,01–2
Основные виды помех	Хаотические импульсные; ретранслированные; структурные; многочастотные; дезинформирующие	Хаотические импульсные; ретранслированные; структурные; многочастотные; дезинформирующие

Решение задач РЭП из района барражирования с первой половины 1980-х гг. по настоящее время возлагаются на самолет ЕС-130Н CompassCall, выполняющий преимущественно задачи подавления систем связи противника. В состав парка самолетов ЕС-130Н CompassCall входят шесть платформ модификации Block-20 и восемь более совершенных самолетов модификации Block-30 (модернизация 1999 г.) [25].

С 2004 г. проводится модернизация всего парка самолетов до уровня Block-35, в рамках которой на самолете устанавливается новое оборудование вскрытия радиоэлектронной обстановки и РЭП. Ключевым элементом программы является оснащение всего парка самолетов ЕС-130Н контейнерной системой РЭП SPEAR (Special Emitter Array). Она позволяет излучать сигналы помех в диапазоне 0,03–3 ГГц по четырем независимым лепесткам диаграммы направленности антенны, используя 144 дискретных передающих элемента [25].

Для того чтобы наиболее рационально провести модернизацию без временного сокращения парка самолетов, принято решение на установку нового оборудования во время проведения планового технического обслуживания и ремонта. Самолет ЕС-130Н CompassCall должен остаться на вооружении до 2025 г. [25].

Основные характеристики разрабатываемых и перспективных самолетных средств РЭП представлены в табл. 1.5 [19].

Таблица 1.5 – Самолетные средства РЭП

Характеристики	Разрабатываемые	Перспективные
Полосы рабочих частот, ГГц	0,2–2; 3,4–8,4; 10–14; 15–40	0,2–2; 3–9; 10–14; 15–100
Мощность одного передатчика /непр./, кВт	0,5–1; (1–2)	0,5–1; (1–2)
Эквивалентный диаметр передающих антенн для направлений «самолет-космос»	1; (3)	1; (3)
Коэффициент усиления передающих антенн для направлений «самолет-космос», дБ	6–24; (10–30); 28–34; (33–41); 33–40; (38–45)	6–24; (10–30); 28–34; (33–41); 33–40; (38–45)
Эквивалентный диаметр передающих антенн для направлений «самолет-земля», м	0,9–1,5	1–1,5
Коэффициент усиления передающих антенн для направлений «самолет-земля», дБ	6–23; 27–32; 29–35	6–23; 27–32; 29–35
Максимальная эквивалентная изотропно-излучаемая мощность в направлении «самолет-космос», дБВт	39–57; (47–67); 61–67; (73–81); 63–68; (71–78)	39–57; (47–67); 61–67; (73–81); 63–68; (71–78)

Максимально эффективно-излучаемая мощность в направлении «самолет-земля», дБВт	39–56; (43–60); 60–65; (67–72); 59–65; (62–68)	39–56; (43–60); 60–65; (67–72); 59–65; (62–67)
Количество передатчиков помех на одном носителе	5–10; (5–15)	6–12; (5–15)
Высота полета в режиме постановки помех, км	3–5; (5–20)	2–5; (5–20)
Удаление зоны барражирования от линии соприкосновения войск, км	30–60; (60–120)	30–60; (60–120)
Время реакции станции помех при подавлении ретранслятора связи с обработкой сигнала, с	0,01–0,1 (при создании шумовых и имитационных помех); 10 ⁻⁴ –0,001 (при создании ретранслированной помехи)	0,01–0,1 (при создании шумовых и имитационных помех); 10 ⁻⁴ –0,001 (при создании ретранслированной помехи)
Время реакции станции помех при подавлении земной станции, с	0,1–5 (при создании шумовых и имитационных помех); 10 ⁻⁴ –0,001 (при создании ретранслированной помехи)	0,1–5 (при создании шумовых и имитационных помех); 10 ⁻⁴ –0,001 (при создании ретранслированной помехи)
Основные виды помех	Шумовые; хаотические импульсные; ретранслированные; структурные (имитац.); дезинформирующие	Шумовые; хаотические импульсные; ретранслированные; структурные (имитац.); дезинформирующие

Данные по количеству самолетов РЭП, находящихся на боевом дежурстве с учетом районов их дислокации и радиуса действия, представлены в табл. 1.6 [19].

Таблица 1.6 – Количество самолетов РЭП, находящихся на боевом дежурстве в различных регионах

Район дисл-ции	Атл. ок-н	Сев. Евр.	Центр. Европа	Южн. Евр.	Ближ. Восток	Центр Азия	Дал. Восток	Инд. ок-н	Тих. ок-н	С-Л ок-н
Кол. (шт)	21	50	35	19	42	7	28	14	14	10

БПЛА обладают рядом преимуществ перед пилотируемыми средствами, в первую очередь – это отсутствие риска для человека. Кроме того, при создании БПЛА проще использовать технологии обеспечения малой заметности, что позволяет им приближаться к цели на более близкое расстояние и находиться в заданном районе требуемое время. Близость к объекту РЭП, в свою очередь, снижает энергетические затраты на постановку помех, а также

обеспечивает перехват маломощных сигналов, излучаемых интересующими объектами, при ведении радио- и радиотехнической разведки [26].

Все существующие и разрабатываемые БПЛА подразделяются на три основных класса: стратегические, тактические и специального назначения. В каждом классе существует более детальная градация: по размеру, дальности действия, продолжительности и высоте полета, а также по характеру использования [26].

Применительно к малым БПЛА оборудование РЭП может размещаться на отдельных образцах при решении специальных задач. Аппаратуру радиоэлектронной защиты устанавливать на них считается нецелесообразным из-за небольших размеров и сравнительно низкой стоимости аппаратов. Наиболее перспективными с точки зрения оснащения системами и средствами РЭП считаются средние БПЛА. Сравнительно небольшие размеры и высокая маневренность, наряду с достаточной грузоподъемностью, делают их эффективными средствами для проникновения в защищенные районы и проведения радиоэлектронных атак на РЭС противника. При этом для повышения степени живучести они могут оборудоваться и средствами индивидуальной радиоэлектронной защиты. На больших БПЛА из-за их высокой стоимости считается целесообразным устанавливать средства индивидуальной радиоэлектронной защиты, причем в ряде случаев постановка помех может осуществляться такими аппаратами из относительно безопасных районов [26].

Средства РЭП, установленные на БПЛА и ЗПП, могут осуществлять подавление в течение всего периода боевого функционирования системы. Основные характеристики комплексов РЭП, устанавливаемых на БПЛА и ЗПП, представлены в табл. 1.7, 1.8 [19].

Таблица 1.7 – Основные характеристики средств РЭП, размещенных на БПЛА

Характеристики	Значения				
	0,2–0,4	1–2	4–6	7–8	20–40
Диапазон (ГГц)	0,2–0,4	1–2	4–6	7–8	20–40
ЭИИМ (дБВт)	33	33	33	33	33
КУ антенны (дБ)	8	8	8	8	8
Макс. дальность полета (км)	2400	2400	2400	2400	2400
Макс. скорость полета (км/ч)	1000	1000	1000	1000	1000
Макс. высота полета (км)	20	20	20	20	20

Таблица 1.8 – Энергетические характеристики ЗПП

Характеристики	Значения				
	0,2–0,4	1–2	4–6	7–8	20–40
Диапазон (ГГц)	0,2–0,4	1–2	4–6	7–8	20–40
ЭИИМ (дБВт)	14	14	14	14	14
КУ антенны (дБ)	1	1	1	1	1

Для подавления каналов космической связи разрабатываются специализированные средства РЭП, размещенные на КА. Данные средства могут оказать существенное подавление как по входу КАС, так и по входу ЗС до момента их уничтожения огневыми средствами наземного, воздушного или космического базирования. Основные характеристики комплексов РЭП, размещенных на КА, представлены в табл. 1.9 [19].

Таблица 1.9 – Космические станции (комплексы) помех космической связи (в составе многоцелевой космической системы РЭБ)

Характеристики	Разрабатываемые	Перспективные
Полосы рабочих частот, ГГц	0,2–2; 3,4–8,4; 10–14; 20–40	0,2–2; 3–9; 10–14; 20–100
Мощность одного передатчика /непр./, кВт	2–5; 10–50	2–5; 20–100
Диаметр передающей антенны, м	30 и более	30–50
Коэффициент усиления антенны, дБ	30–50; 57–60; 59–60; 60–63	30–50; 57–60; 59–60; 60–63
Максимальная эквивалентная изотропно-излучаемая мощность, дБВт	60–87; 94–97; 96–97; 97–100; до 110	60–87; 90–97; 97–98; 98–100; до 110
Количество передатчиков /ретрансляторов/ помех на одном ИСЗ	1–2	2–3
Добротность приемной системы, дБ/град.К (в поддиапазонах)	(–1) – 19; 25–31; 31–34; 34–39	0–20; 25–31; 31–34; 34–39
Высота орбит ИСЗ-поставщиков помех, тыс. км	0,6–40	0,6–40
Тип ИСЗ-поставщика помех	Автономный комплекс РЭП	Автономный комплекс РЭП
Подавляемые направления связи	«КАС-Земля»; «Земля-КАС»; «КАС-КАС»	«КАС-Земля»; «Земля-КАС»; «КАС-КАС»
Время реакции при подавлении наземной станции: – в режиме прицельных помех, с – в режиме ретрансляции, мс	0,1–10 1–10	0,01–1 1–10
Основные виды помех	Ретранслированные; шумовые; структурные (имитационные); дезинформирующие	Ретранслированные; шумовые; структурные (имитационные); дезинформирующие

Дополнительно к специализированным средствам постановки помех для целей разведки и постановки несложных по структуре помех линиям спутниковой связи США располагают сетью глобально размещенных стан-

ций слежения за КАС и перехвата их радиосигналов в составе центров и постов систем стратегической РРТР 466L и контроля космического пространства SPADATS, а также станций спутниковой связи как военного, так и коммерческого назначения большой мощности. Эти станции по диапазонам рабочих частот, техническим параметрам, местоположению и наличию инфраструктуры управления пригодны для постановки помех КА. Для обеспечения использования передатчиков земных станций спутниковой связи в качестве источников преднамеренных помех может применяться серийно выпускаемая аппаратура радиоразведки, управления и формирования помех [19].

На основании анализа технических параметров и состава систем спутниковой связи США и НАТО установлено [19], что стационарные станции этих систем без существенных затрат (в рамках программ модернизации) могут быть приспособлены под станцию помех в диапазонах частот 1,5/1,6, 4/6, 8/7 ГГц. Для этих целей наиболее пригодны стационарные станции систем INTELSAT, NATO-SATCOM и DSCS с энергопотенциалом 87–100 дБВт, а также многодиапазонные подвижные станции спутниковой связи нового поколения с ЭИИМ 80 дБВт, которые, благодаря унификации оборудования, могут использоваться непосредственно в режиме станции помех. Анализ показал, что эффективность применения этих средств в целях РЭП может быть повышена путем их частичной модернизации и дооборудования серийно выпускаемой анализирующей и контрольно-управляющей аппаратурой для формирования помех, близких к оптимальным [19].

Станции военных и коммерческих систем спутниковой связи, дооборудованные приставками формирования помех, могут осуществлять подавление КАС в течение всего периода боевых действий. Их количество в 2011 г. могло составить величину порядка 50–60 шт.

Распределение по регионам мира стационарных станций спутниковой связи (с ЭИИМ более 87 дБВт), являющихся наиболее опасными потенциальными источниками помех линиям спутниковой связи, представлено в табл. 1.10 [19].

Таблица 1.10 – Распределение по регионам мира стационарных станций

Регионы	Количество потенциально-опасных средств спутниковой связи			
	военных		коммерческих	
	ДСЦС	Сатком	Intelsat	Национальные
Континент США:				
поб. Тихого о-на	18 (4)	–	8 (2)	4 (1)
поб. Атлантического о-на	25 (7)	2 (1)	2 (1)	3 (1)
Аляска	5 (2)	–	3 (1)	1 (0)
Канада, Гренландия	2 (0)	2 (0)	2 (0)	25 (4)
Западная Европа	23 (6)	19 (4)	34 (10)	3 (0)
Зона Атлантики	5 (1)	1 (0)	2 (0)	–
Зона Тихого океана	16 (6)	–	14 (5)	–
Зона Индийского океана	2 (0)	–	Н.д.	–
Турция	2 (0)	3 (1)	3 (1)	–
Япония	3 (0)	–	7 (3)	9 (1)

В скобках указано максимальное число передающих станций, которые могут быть выделены для РЭП линий спутниковой связи.

В силу своих специфических особенностей транспортная наземно-космическая сеть ОСССН уязвима к воздействию средств РЭП, которые в настоящее время активно совершенствуются в ВС наиболее развитых в военном отношении стран, при этом воздействию будут подвергаться как КАС, так и ЦССС. Перспективные средства РЭП будут активно использовать структурные (имитационные) и дезинформирующие помехи, эффекты от воздействия которых проявляются не только на физическом и канальном, но и на сетевом уровне ЭМВОС.

1.2.2 Анализ способов и средств помехозащиты наземно-космических сетей связи в условиях воздействия средств РЭП

Согласно [12] к НКСС предъявляются следующие оперативно технические требования в части помехозащищенности:

1. Обеспечение комплексной высокой помехозащищенности от различного вида помех: импульсных, заградительных, случайных, помех вслед с расстояния не более 50 км (в НКСС предыдущего поколения это расстояние составляло 500 км) и помех из-за многолучевого распространения сигнала.

2. Обеспечение ППРЧ в полосе 2 ГГц на линии ЗС-КАС, 1 ГГц на линии КАС-ЗС.

3. Обеспечение высокой разведзащищенности.

4. Обеспечение устойчивой работы в условиях возмущенной ионосферы.

Анализ данных требований к системе ППРЧ показал, что в основе методов помехозащиты в НКСС лежат следующие принципы:

– обеспечение работы системы ППРЧ как на линии ЗС-КАС, так и на линии КАС-ЗС в пределах полосы, выделенной для Ка-диапазона;

– обеспечение для режима ППРЧ максимально-возможной скорости переключения частот, определяемой техническими возможностями аппаратуры;

– система ППРЧ должна эффективно работать совместно с различными видами модуляции и кодирования;

– различные параметры системы ППРЧ (скорость перестройки, виды и скорости кодирования, виды модуляции и др.) динамически меняются в зависимости от помеховой обстановки, что позволит «разменивать» помехозащиту на пропускную способность, т.е. в режиме высокой помехозащиты будет низкая пропускная способность, а в режиме низкой помехозащиты, когда отсутствуют помехи, будет обеспечиваться высокая пропускная способность;

– система помехозащиты КАС обеспечивает обнаружение воздействия преднамеренных помех со стороны средств РЭП и непреднамеренных помех и в соответствии с этим устанавливает требуемый уровень помехозащиты за счет снижения пропускной способности. При этом данные на перестройку системы помехозащиты должны автоматически доводиться до ЗС;

– система ППРЧ гибко сочетается с динамической системой много-
станционного доступа, которая позволит наиболее эффективно использовать
частотно-временной ресурс КАС;

– на линии КАС-ЗС, как и на линии ЗС-КАС, обеспечивается когерент-
ный прием информационных пакетов;

– для передачи различных видов информации используется единый
транспортный поток данных, а скорость передачи должна гибко меняться в
зависимости от ресурса пропускной способности, выделенной каждой ЗС.

Реализация режима ППРЧ на линии ЗС-КАС и КАС-ЗС позволяет
обеспечить устойчивую синхронизацию в НКСС. Кроме того, это позволяет
обеспечить когерентный прием информационных пакетов с неопределенной
начальной фазой, что дает дополнительный выигрыш по помехоустойчиво-
сти до 3 дБ.

В зависимости от сигнально-помеховой обстановки устанавливаются
различные варианты частотно-временного доступа, различные длины паке-
тов, различное кодирование и различные стратегии ППРЧ.

Для эффективной работы системы ППРЧ предусматривается создание
системы мониторинга сигнально-помеховой обстановки:

– мониторинг частотного спектра в полосе 2 ГГц;

– мониторинг качества приема информационных пакетов.

Мониторинг частотного спектра может быть организован как перед
началом работы спутниковых станций, так и в процессе их работы. Для мо-
ниторинга и приема многочастотного сигнала используется одно и то же
приемное устройство. Данные мониторинга используются для того, чтобы
исключить для работы участки частотного диапазона, пораженные помехами.
Данные мониторинга централизованно доводятся до ЗС и используются для
формирования нового закона ППРЧ.

Кроме того, в процессе приема информационных пакетов в приемном
устройстве происходит измерение отношения сигнала к шуму и помехе
(ОСШП) для каждого пакета и оценка качества его приема. Эта информация
также используется для оценки сигнально-помеховой обстановки и для при-
нятия решения об изменении закона ППРЧ.

Современная элементная база (синтезаторы частоты) позволяет обеспе-
чить время стояния на одной частотной позиции порядка 100 мкс.

Различные методы кодирования информации совместно с ППРЧ также
позволяют повысить помехозащищенность НКСС. На линии КАС-ЗС будут
использоваться следующие виды кодирования:

– сверточное;

– Рида-Соломона;

– коды с низкой плотностью проверки на четность (LDPC – Low-density
Parity-check Code);

– код Боуза-Чоудхури-Хоквенгема (БЧХ).

Особенность реализации данных кодов заключается в том, что их деко-
деры реализуются на высоких скоростях и при этом организуется их конвей-

ерная обработка. Дополнительно с кодированием будет использоваться перемежение символов. Для дополнительного повышения помехозащиты за счет существенного снижения пропускной способности, в частности для персональной связи, для кодирования возможно использование m -последовательности или более мощных кодов типа Рида-Малера.

Система автоматического регулирования выходной мощности спутниковых станций также является одним из способов повышения помехозащиты. Установка минимальной мощности на КАС позволяет уменьшить вероятность обнаружения сигнала средствами РЭП и, следовательно, вероятность постановки помех.

Кроме того, для повышения помехозащиты планируется организация автоматической повторной передачи пакетов в случае их потери. Данная процедура предусмотрена в протоколе TSP/IP, однако эта процедура неадаптирована для спутникового канала по причине необходимости разработки ускорителя передачи пакетов, который автоматически инициирует повторную передачу потерянных пакетов.

Способы и средства обеспечения помехозащищенности связи в транспортной наземно-космической сети ОСССН ориентированы на физический (ППРЧ, система автоматического регулирования выходной мощности передатчиков) и канальный (помехоустойчивое кодирование) уровни ЭМВОС, в то время как на сетевом уровне, в достаточно отдаленной перспективе, предполагается лишь организация автоматической повторной передачи пакетов в случае их потери. Вместе с тем, наличие системы мониторинга сигнально-помеховой обстановки, создаваемой для повышения эффективности работы системы ППРЧ, делает возможным разработку комплекса средств помехозащиты сетевого уровня ЭМВОС, для функционирования которых могут использоваться данные этого мониторинга.

1.2.3 Результаты имитационного моделирования

Анализ руководящих документов [12, 27, 28], проведенный в работах [5, 29], позволил определить требования к устойчивости связи, предъявляемые к транспортной наземно-космической сети ОСССН с учетом необходимости обеспечения своевременности боевого управления войсками, соединениями и подразделениями в условиях воздействия средств РЭП. Показателем, отражающим способность транспортной наземно-космической сети связи ОСССН своевременно осуществлять передачу трафика, является вероятность своевременной доставки пакета ($P_{сд}$). Для трафика передачи данных значение этого показателя, определяемое в [12, 27, 28], составляет $P_{сд} = 0,9$ за время доставки $T_{дост} = 3$ с.

Вместе с тем, как показано выше, протоколы маршрутизации в составе стека технологии АТМ создавались для использования в невоенных сетях связи, что, в совокупности с уязвимостью НКСС перед воздействием средств РЭП, указывает на необходимость исследования их функционирования в

условиях целенаправленного подавления КС средствами РЭП. Данное исследование было проведено на основе модели транспортной наземно-космической сети ОСССН (см. рис. 1.2), разработанной на основе программного продукта [30].

Приняты следующие ограничения имитационного моделирования:

1. Количество классов сервиса – 3.
2. Процент КС в сети, на которые воздействуют средства РЭП – 0...60 %.
3. Объем входного буфера маршрутизатора – 10^3 пак.
4. Объем выходного буфера маршрутизатора – 10^2 пак.
5. Интенсивность информационного трафика – 10·МБит/с.
6. Интенсивность служебного трафика – 1 Мбит/с.
7. Пропускная способность КС и маршрутизаторов – 2 МБит/с.
8. Время задержки в КС – 100 мс.

Результаты моделирования приведены на рис. 1.6.



Рис. 1.6 – Прототип сети связи в рамках имитационного моделирования

Результаты проведенного моделирования показывают, что при воздействии средств РЭП только на 20 % КС в СС, вероятность своевременной доставки пакета снижается до величины $P_{сд} = 0,82$, что противоречит указанным выше требованиям по устойчивости, предъявляемым к транспортной наземно-космической сети ОСССН.

1.3 Анализ научно-методического аппарата решения задач маршрутизации в целях обеспечения устойчивости НКСС на сетевом уровне ЭМВОС в условиях воздействия средств РЭП

1.3.1 Анализ подходов к оценке устойчивости связи

В течение продолжительного промежутка времени под устойчивостью связи понималась совокупность трех свойств: надежности, живучести и

помехоустойчивости [31]. Авторы монографии [31] указывали, что применение интегральной категории устойчивости не предполагает ликвидации составляющих ее понятий. При этом надежность отражает влияние на работоспособность системы главным образом внутрисистемного фактора – случайных отказов техники, а живучесть же характеризует устойчивость системы связи против действия причин, лежащих вне системы и приводящих к разрушениям или значительным повреждениям некоторой части ее элементов. Подчеркивалось, что надежность и живучесть – существенно различные понятия и самостоятельные проблемы, требующие своих решений при разработке и совершенствовании систем и сетей связи [32].

В работе [33], авторами давалось следующее определение: «Устойчивость – способность сети сохранять работоспособное состояние во времени и в условиях, создаваемых воздействиями внешних и внутренних деструктивных факторов (ДФ)». При этом пояснялось, что устойчивость характеризуется свойствами надежности и живучести. Далее указывалось, что свойство надежности должно обеспечивать функционирование сети связи и ее элементов в условиях действия внутренних непреднамеренных (случайных) ДФ, а живучесть – свойство сети сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях, создаваемых воздействием внешних ДФ [32].

В работе [34] приводятся определения понятий устойчивости, целостности и безопасности единой сети связи, используемых в законах «О техническом регулировании» (2002 г.) и «О связи» (2003 г.). В частности, в ней дается следующее определение: «Устойчивость функционирования единой сети электросвязи – свойство сети связи выполнять свои функции при воздействии внешних дестабилизирующих факторов».

В настоящее время требования к устойчивости функционирования сетей электросвязи, входящих в состав сети связи общего пользования, и методы их проверки установлены в ГОСТ 5311-2008 [35]. В данном нормативном документе приведены следующие основные определения.

Устойчивость функционирования сети электросвязи – способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов [35].

Дестабилизирующий фактор – воздействие на сеть электросвязи, источником которого является физический или технологический процесс внутреннего или внешнего по отношению к сети электросвязи характера, приводящее к выходу из строя элементов сети [35].

Коэффициент готовности – вероятность того, что объект находится в работоспособном состоянии в любой момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается [35].

Надежность сети электросвязи – свойство сети электросвязи сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях воздействия внутренних дестабилизирующих факторов (т.е. сохранять во

времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения и технического обслуживания) [35].

Внутренний дестабилизирующий фактор – дестабилизирующий фактор, источник которого расположен внутри сети электросвязи или ее элементов [35].

Живучесть сети электросвязи – свойство сети электросвязи сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях, создаваемых воздействиями внешних дестабилизирующих факторов [35].

Внешний дестабилизирующих факторов – дестабилизирующий фактор, источник которого расположен вне сети электросвязи [35].

Работоспособное состояние – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять им свои функции, соответствует требованиям или нормам [35].

Среднее время между отказами – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки [35].

Направление связи (основное направление связи) – совокупность линий передачи и узлов связи, обеспечивающая связь между двумя пунктами сети для обеспечения деятельности органов государственного управления, обороны, безопасности, охраны правопорядка, мобилизационной готовности при чрезвычайных ситуациях [35].

Вероятность связности (связность) направления электросвязи – вероятность того, что на заданном направлении электросвязи существует хотя бы один путь, по которому возможна передача информации с требуемым качеством и объемом [35].

Граф сети связи – математическая модель сети электросвязи, представляющая собой совокупность вершин (узлов связи) и соединяющих их ребер (линий связи) [35].

Элемент (объект) сети электросвязи – отображаемые на графе сети электросвязи вершинами и ребрами узлы связи и соединяющие их линии (совокупность линий) связи [35].

Вместе с тем, как показано в работе [36], устойчивость связи, являясь одним из основных свойств СВС, характеризуется некоторыми терминологическими отличиями в ходе своей оценке. Так, в соответствии с руководящими документами, в качестве внешних ДФ рассматриваются отдельно обычное и ядерное оружие противника, а также естественные и преднамеренные помехи. В [37] отражена специфика оценки устойчивости систем военной связи (СВС), включающая в себя:

Живучесть – способность СВС обеспечивать управление войсками, силами и оружием в условиях воздействия обычного и ядерного оружия противника [37].

Помехоустойчивость – способность СВС обеспечивать управление войсками, силами и оружием в условиях воздействия естественных помех [37].

Помехозащищенность – способность СВС обеспечивать управление войсками, силами и оружием в условиях воздействия преднамеренных помех противника [37].

Надежность – способность СВС обеспечивать связь, сохраняя во времени значения эксплуатационных показателей в пределах, соответствующих условиям эксплуатации, технического обслуживания восстановления и ремонта [37].

В работе [38] показано место устойчивости СВС в общей системе управления войсками и оружием (рис. 1.7).

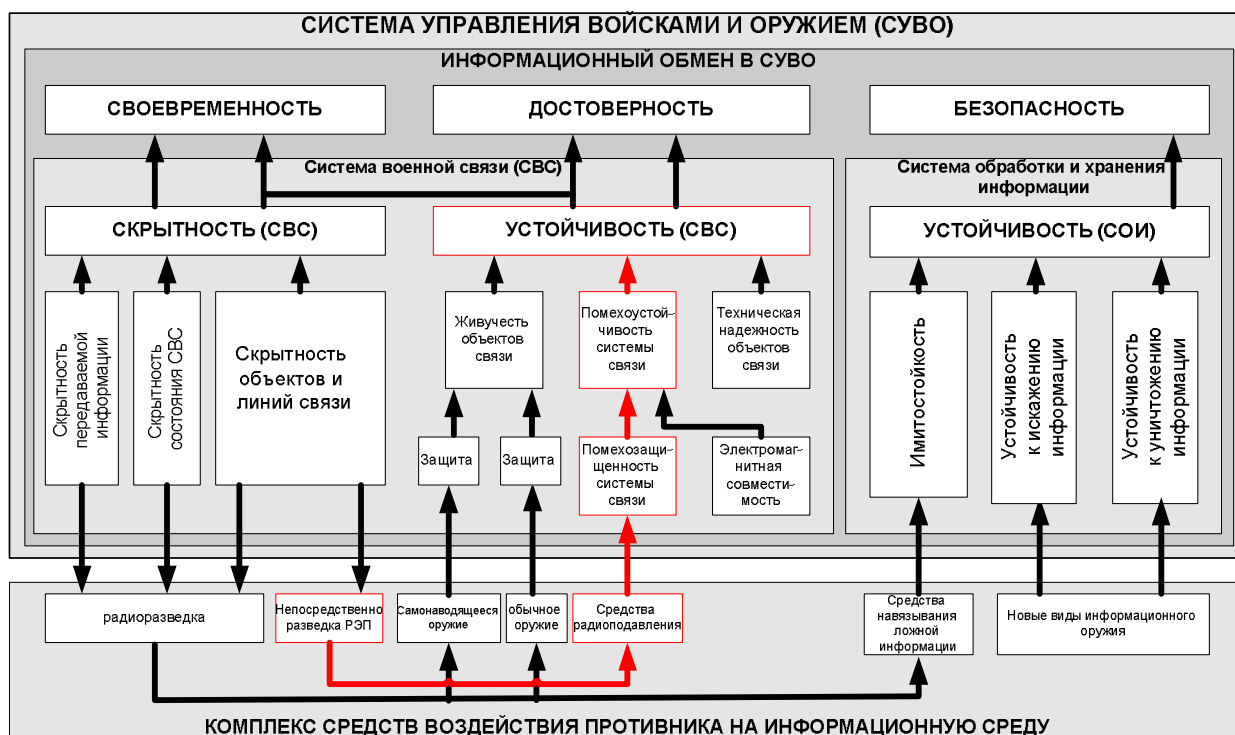


Рис. 1.7 – Место устойчивости СВС в системе управления войсками и оружием

Понятие устойчивости связи и методы ее оценивания определяются соответствующими руководящими документами. В условиях, когда воздействие внутренних ДФ, влияющих на надежность СС, в достаточной мере формализовано, а вероятность воздействия оружия противника на инфраструктуру транспортной наземно-космической сети ОСССН (свойство живучести) намного ниже, нежели вероятность воздействия средств РЭП, особую важность для повышения устойчивости НКСС, как комплексного свойства, приобретает повышение помехозащищенности.

1.3.2 Анализ НМА исследования эффектов от воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС

В настоящее время в наиболее развитых в военном отношении странах активно совершенствуется научно-методический аппарат ведения информа-

ционного противоборства, в том числе в информационно-технической сфере. В соответствии с современными взглядами, информационное противоборство в технической сфере достигается за счет проведения информационных операций, представляющих собой комплекс информационно-технических воздействий (ИТВ), реализуемых за счет применения информационного оружия. В рамках развития теории применения наступательных ИТВ рассматривается комплексное применение различных видов воздействий в рамках единой информационной операции, в том числе [39]:

- радиоэлектронное подавление (РЭП);
- функциональное поражение специальными программными средствами;
- функциональное поражение электромагнитным излучением.

При этом развитие методологии применения данных воздействий предусматривает изменение объекта воздействия с отдельных каналов и узлов связи на отдельные сети, области маршрутизации и телекоммуникационные узлы. Таким образом, основной эффект воздействия перспективных ИТВ противника ориентирован на канальный, сетевой и транспортный уровни функционирования систем связи, которые являются технической основой информационного пространства.

Для ведения информационного противоборства в информационно-технической сфере наиболее развитыми в военном отношении странами созданы отдельные подразделения (кибернетические командования), основной целью которых является координация и комплексное применение средств ИТВ при ведении военного противоборства в информационном пространстве с целью дезорганизации системы военного управления противника. Кроме того, согласно «Всестороннему обзору состояния и перспектив развития вооруженных сил США» (2010), одними из семи приоритетных областей научно-исследовательской работы (НИР) являются разработки в областях кибертехнологий и РЭП. При этом на НИР МО США израсходовало в 2014 году более 14 млрд долл. Таким образом, в ближайшее время следует ожидать появления новых видов и способов ИТВ на СС, в том числе и ориентированных на новые принципы подавления НКСС.

ИТВ средствами территориально распределенной разнородной группировки РЭП с одновременным выборочным применением средств функционального поражения в рамках единой информационной операции позволит реализовать эффективное противодействие сетевидному принципу управления.

В отечественной науке особенности воздействия средств РЭП на сети и системы военной связи исследовались в ФГНИИИЦ РЭБ ОЭСЗ (г. Воронеж), ВУНЦ ВВС «ВВА имени проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), ВАС имени С.М. Буденного (г. Санкт-Петербург), ВКА имени А.Ф. Можайского (г. Санкт-Петербург), ВМИРЭ имени А.С. Попова ВУНЦ ВМФ (г. Петродворец), ВАГШ ВС РФ (г. Москва), 4 ЦНИИ Минобороны (г. Юбилейный), 24 ЦНИИ Минобороны (г. Петродворец), 27 ЦНИИ Минобороны (г. Москва), 16 ЦНИИ Минобороны (г. Москва), ГНИИИ ПТЗИ

ФСТЭК (г. Воронеж), Академия ФСО (г. Орел), ИППИ имени А.А. Харкевича РАН (г. Москва), ОАО «Концерн «Созвездие»» (г. Воронеж), ОАО «Концерн «Системпром»» (г. Москва), НИИ «Масштаб» (г. Санкт-Петербург), СПИИРАН (г. Санкт-Петербург), НПО «Импульс» (г. Санкт-Петербург), ОАО «НИИ «Рубин»» (г. Санкт-Петербург), ИВМ СО РАН (г. Новосибирск), ЦНИРТИ (г. Москва).

Так, в работах А.И. Паляя, С.А. Вакина, Л.А. Шустова, В.И. Борисова, Г.И. Тузова, М.В. Максимова, В.В. Зяблова, Н.И. Калашникова, В.В. Колмыкова, Л.М. Финка, И.Н. Амиантова подробно исследовались вопросы помехоустойчивости для различных каналов радиосвязи при воздействии средств РЭП.

В работах В.И. Владимирова, А.Н. Путилина, С.И. Бабусенко, В.В. Исаяева, Р.А. Червинского, В.С. Пирумова исследовались изменения параметров систем радиосвязи канального уровня модели ЭМВОС в условиях воздействия средств РЭП, оценивается эффективность качества функционирования систем связи в составе системы управления войсками. Однако особенностью данных работ является рассмотрение непосредственно процесса подавления линий радиосвязи без учета воздействия деструктивных факторов на процессы коммутации и маршрутизации в узлах связи и структуру передаваемых по сети информационных потоков. В данных работах также отсутствуют системные исследования эффектов воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС. Не учитывалось и влияние средств РЭП на процессы маршрутизации в распределенных сетях, а также в сетях с динамически изменяемой топологией. Как правило, не рассматривались вопросы обеспечения заданного качества обслуживания в распределенных сетях, находящихся под воздействием средств РЭП. В работах В.В. Акбашева исследовались вопросы воздействия средств функционального поражения электромагнитным излучением на современные телекоммуникационные системы, однако не рассматривались вопросы влияния данных средств на структуру информационных потоков и влияние эффектов данного воздействия на функционирование протоколов канального и сетевого уровней ЭМВОС.

Необходимо отметить, что в работах А.В. Боговика, В.В. Игнатова, С.Е. Ададунова, В.К. Попкова, Л.Б. Богуславского, Л.А. Растригина, Ф.А. Складяевича, В.П. Шувалова рассматривались вопросы влияния воздействия деструктивных факторов и динамического изменения топологии сети на процессы сетевого уровня. Изменение потоков сообщений в узлах информационных сетей в силу реконфигурации маршрутов сообщений на сетевом уровне или отказа отдельных элементов сети исследовали Л.Б. Богуславский, Л.А. Растригин, Ф.А. Складяевич. Вопросы информационного обмена в сетях со сложной структурой и динамической топологией рассматривались в работах Ю.Ю. Громова, В.О. Драчева, К.А. Набатова, О.Г. Иванова, А.А. Сорокина, М.Ю. Самсонова. Однако в данных работах не учитывались специфика СВС и особенности поражения ее элементов воздействиями, ориентированными на сетевой уровень ЭМВОС. В работах А.В. Боговика, В.В. Игнатова и В.К. Попкова не рассматривались особенности процессов маршрутизации в

сетях военной связи с переменной топологией, а в работах С.Е. Ададунова – подробно рассматривались процессы маршрутизации, частично рассматриваются эффекты от воздействия средств РЭП, однако не учтено многообразие эффектов от такого воздействия на маршрутизацию в сети.

В последнее время активно ведутся исследования в области развития как средств РЭП и ФП, так и способов их применения для ИТВ по отношению к элементам систем военной связи. К работам в данной области стоит отнести труды С.Н. Гриняева, Ю.И. Стародубцева, В.Ю. Храмова, П.И. Антоновича, С.С. Семенова, Е.В. Гречишникова, А.Е. Кондратьева, В.С. Пирумова, В.И. Емелина, С.И. Макаренко. Как правило, ИТВ ориентированы на деградацию процессов информационного обмена в узлах связи, прекращение доступа к услугам связи и разрушение информационных потоков. Таким образом, описание эффектов такого воздействия связано с процессами обработки информационных потоков в узлах связи, с вопросами изменения структуры информационных потоков, с появлением свойств нестационарности и особенностями их дальнейшей обработки, с функциональной и структурной деградацией сети вследствие ограниченной доступности ее ресурсов.

Анализу возможности комплексного воздействия средств РЭП на уровни транспортной подсистемы: физического, канального и сетевого уровней в структуре ЭМВОС посвящено исследование [40]. Данное исследование определяют облик СС в плане возможностей адаптации и отражает эффекты взаимодействия сигналов и помех (рис. 1.8).



Рис. 1.8 – ЭМВОС и эффекты от воздействия помех

Следует отметить, что в указанных работах СС формализуется полносвязным графом, ребра которого формализуют общий радиоканал, представляющий собой своеобразный интерфейс, через который средства РЭП взаимодействует с группой узлов на локальной области [22]. Принцип информационного обмена, основанный на широкополосной рассылке пакетов в се-

ти по общему радиоканалу, применяется в Mesh-сетях (IEEE 802.11s), которые могут быть внедрены в наземный полевой сегмент ОСССН [5, 29], однако к транспортной НКСС данный подход неприменим.

Оценка функционирования методов маршрутизации в СС в зависимости от процента КС, находящихся в неопределенном состоянии, а также от интенсивности поступающего в СС трафика, как возможного эффекта от воздействия средств РЭП, произведена в работе [41] (результаты приведены на рис. 1.9).

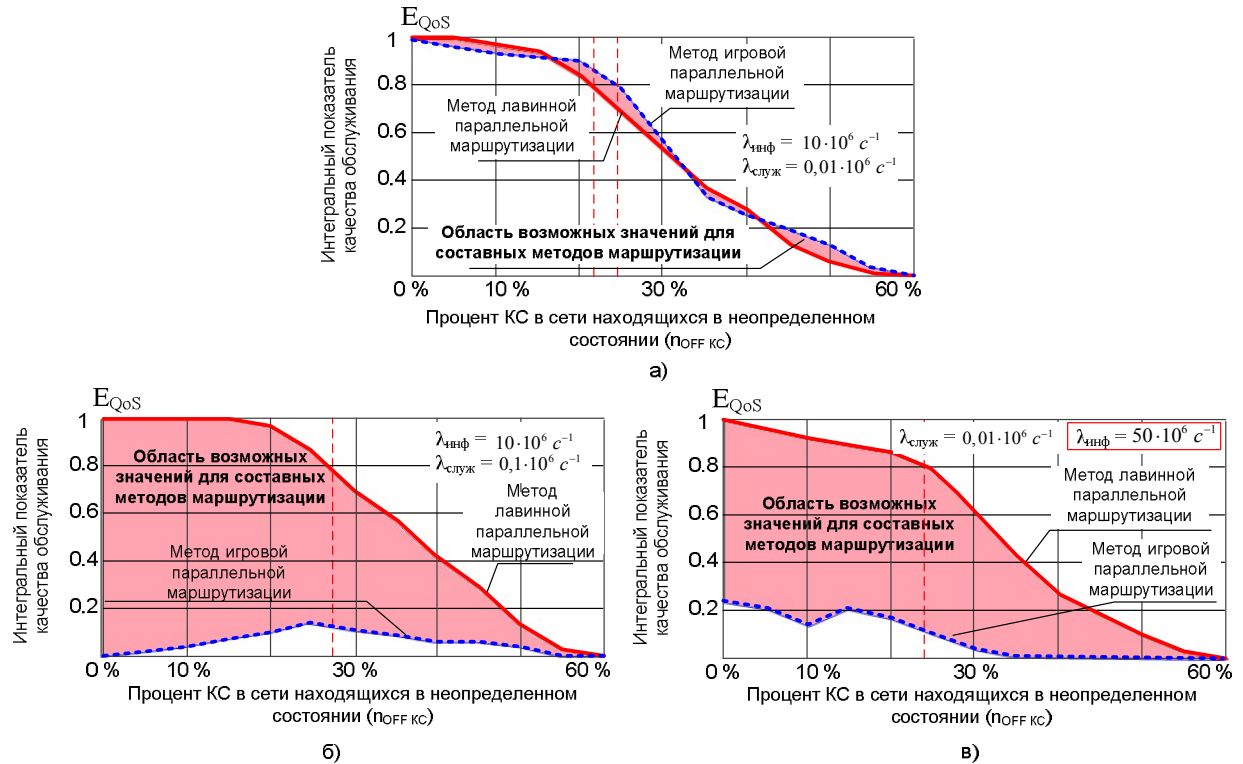


Рис. 1.9 – Оценка эффективности функционирования методов маршрутизации

На рис. 1.9, а приведен график зависимости интегрального критерия качества обслуживания пользователей сети (E_{QoS}) для динамических методов маршрутизации при начальных условиях. При увеличении служебной нагрузки в 10 раз получены зависимости, изображенные на рис. 1.9, б. На рис. 1.9, в приведены результаты исследований для случая увеличения интенсивности информационных потоков в 5 раз с $10 \cdot 10^6$ до $50 \cdot 10^6$ пак./с при интенсивности генерации служебной нагрузки $0,01 \cdot 10^6$ пак./с. Анализ результатов работы [41] показывает, что увеличение служебной нагрузки, создаваемой методами маршрутизации в 10 раз приводит к существенному изменению влияния на интегральную оценку качества обслуживания, при этом игровые методы маршрутизации подвержены этому влиянию в большей степени. Аналогичный эффект достигается при увеличении интенсивности информационных потоков в сети. При этом вывод в неработоспособное состояние 10–20 % КС соответствует снижению E_{QoS} до 0,9. При выводе из строя 25–27 % КС, сеть снижает качество обслуживания менее 0,8, причем при дальнейшем увеличении количества неработоспособных каналов в СС (свы-

ше 27 %) ухудшение эффективности функционирования алгоритмов маршрутизации в сети становится необратимым.

В настоящее время эффекты от воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС недостаточно изучены. Тем не менее, ряд работ, посвященных разработке элементов НМА в данной области, указывают на принципиальную возможность подавления сетей связи на сетевом уровне ЭМВОС. Для разработки адекватных мер противодействия угрозе подобного подавления необходимо проанализировать функции сетевого уровня ЭМВОС применительно к их использованию для повышения помехозащищенности, а, следовательно, и устойчивости НКСС.

1.3.3 Анализ НМА обеспечения устойчивости сетей связи на сетевом уровне ЭМВОС

С ростом требований к обеспечению устойчивости связи, все больше внимания уделяется средствам маршрутизации. Причина этого состоит в том, что функционал Diff Serv, основанный на приоритетной обработке пакетов на узлах (маршрутизаторах) СС, способен повысить уровень качества обслуживания (QoS – Quality of Service) на отдельных элементах сети, в то время как именно маршрутизация является инструментом обеспечения требуемых значений ключевых межконцевых QoS-показателей. Таким образом, технологии маршрутизации вышли за рамки средств поиска лишь доступных маршрутов в сети; протокол маршрутизации в идеале должен обеспечивать расчет одного или нескольких путей доставки пакетов, вдоль которых будут выполняться все описанные в договоре требования к качеству обслуживания, что является формулой концепции QoS-маршрутизации [42, 43], определяющей направление развития моделей, методов, а также, впоследствии, алгоритмов и протоколов маршрутизации.

Ввиду актуальности задач QoS-маршрутизации с точки зрения как теории, так и практики учеными и производителями сетевого оборудования предложен ряд разноплановых решений, отличающихся степенью учета состояния СС, вычислительной сложностью, уровнем гарантий относительно качества обслуживания, а в конечном итоге, и предполагаемой областью применения. Таким образом, необходимо провести анализ технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания для сравнения их преимуществ и недостатков, а также определения наиболее перспективных путей повышения устойчивости связи.

Средства поддержки качества обслуживания в современных протоколах маршрутизации в последнее время эволюционировали, прежде всего, за счет пересмотра метрик, используемых при выборе маршрута. Во-первых, происходит отказ от топологических метрик – числа переприемов, характерного для протокола RIP (Routing Information Protocol), и осуществляется переход на QoS-метрики, основанные на учете основных показателей качества обслуживания: скорости передачи, средних задержек, уровня потерь в трак-

тах передачи сети. В результате маршруты передачи пакетов того или иного трафика прокладываются с учетом QoS-показателей. Во-вторых, увеличивается число протоколов, которые поддерживают так называемые комбинированные метрики, в рамках которых учитываются одновременно несколько основных QoS-показателей.

Однако существующие на сегодняшний день протоколы не в полной мере отвечают требованиям концепции QoS-маршрутизации, поскольку в них заложена идея поиска кратчайшего пути в одной, пусть даже комбинированной, метрике без учета достигаемых при этом значений других метрик [44–50]. Так, например, несмотря на то, что в рамках протокола EIGRP (Enhanced Interior Gateway Protocol – усовершенствованный протокол внутреннего шлюза) при выборе маршрута может учитываться множество показателей качества обслуживания (задержка, загрузка, надежность, пропускная способность), использование комбинированной метрики вовсе не гарантирует наилучшего пути. Более того, задержка, используемая в EIGRP, является административно назначаемым при настройке интерфейса параметром и в общем случае может не соответствовать той величине задержки, которая на самом деле имеет место на данном интерфейсе.

Другой проблемой, связанной с применением существующих протоколов маршрутизации, является несбалансированное использование сетевых ресурсов. В основу наиболее важных протоколов маршрутизации положены алгоритмы нахождения кратчайшего пути в графе (Дейкстры или Беллмана-Форда) [44–50], результатом работы которых является один, кратчайший в выбранной метрике, путь. Поскольку ни в одном из упомянутых выше протоколов в метрику не входит доступная (не задействованная) пропускная способность трактов передачи, всегда для заданной пары адресатов в качестве кратчайшего будет выбираться один и тот же путь, что в конечном итоге приводит к его перегрузке даже при наличии свободных обходных маршрутов. Исключение составляет алгоритм Constrained Shortest Path First (CSPF), применяемый в сетях MPLS TE для расчета пути коммутации меток (Label Switching Path, LSP) и учитывающий при этом текущую загруженность трактов передачи и атрибуты нового LSP. Целесообразным решением в данной ситуации является многопутевая маршрутизация с балансировкой нагрузки не только между путями равной стоимости, но и между путями неравной стоимости [51], которая присутствует только в протоколах IGRP (Interior Gateway Protocol – протокол внутреннего шлюза), EIGRP и внутридодоменной версии BGP – iBGP (Interior BGP). При этом, как правило, ручная балансировка между маршрутами с различной стоимостью в рамках данных протоколов требует дополнительных настроек и зачастую ими не используется.

Вычисление маршрута в рассмотренных выше протоколах маршрутизации как внутренних, так и внешних (межсетевых или междоменных) реализуется распределенно и в момент поступления трафика в сеть, т.е. по требованию. Однако, как отмечается в ряде работ [52–56], при переходе к QoS-маршрутизации заслуживают внимания следующие маршрутные концепции.

Имеется в виду во-первых, концепция централизованного вычисления путей в рамках маршрутизации от источника, концепция сервера маршрутов [57–58], во-вторых, концепция предвычисления путей [57, 59–61]. При решении задач внутренней маршрутизации функции сервера маршрутов в зависимости от сетевой архитектуры возлагаются на различные устройства: элемент вычисления путей в домене MPLS [62–65]; брокер пропускной способности в домене IP-сети [57, 66–68] или иное специализированное устройство, например, сервер маршрутизации для сетей MPLS [58, 64] или управляющая маршрутами BGP-платформа [67]. Наличие единого центра управления в сети (домене) позволяет не только решить задачу маршрутизации оптимально с точки зрения всей сети и ее текущего состояния, но и обеспечить решение задач управления доступом и резервирования ресурсов, что немаловажно для обеспечения гарантированного QoS в целом. Масштабируемость в условиях централизованного принятия решения сервером RS обеспечивается за счет предвычисления путей и для MPLS – за счет предварительного установления пути коммутации меток LSP [57].

Протокол маршрутизации PNNI, используемый в составе технологии ATM, реализует стратегию маршрутизации «от источника», поддерживая композитную метрику по ключевым показателям качества обслуживания, к которым, относятся прежде всего, доступная скорость передачи ячеек (AvCR – Available Cell Rate); максимальная задержка передачи ячеек (MaxCTD – Maximum Cell Transfer Delay); процент потерь (CLR – Cell Loss Ratio) – среднее количество потерянных во время передачи ячеек; разброс задержки (CDV – Cell Delay Variation); максимальная скорость передачи (MaxCR – Maximum Cell Rate) [68]. Однако наряду с традиционными достоинствами, с точки зрения поддержки функциональности качества обслуживания, данный маршрутизирующий протокол является и сигнальным протоколом, отвечающим за установление соединения и обеспечение QoS на основе резервирования ресурсов. Интеграция в рамках одного протокола функций маршрутизации и сигнализации заметно повышает его возможности с точки зрения обеспечения качества обслуживания.

В области внешней (межсетевой или междоменной) маршрутизации выделяются два направления развития. Первое связано с использованием протокола пограничного шлюза BGP и его QoS-расширения [50, 68]. Как известно, BGP является протоколом маршрутизации дистанционно-векторного типа, в котором решение о направлении продвижения пакета принимается каждым узлом в отдельности (подход hop-by-hop) [50–51]. Отсутствие на маршрутизаторе информации о текущем состоянии всей сети не позволяет в условиях применения BGP получить в конечном итоге маршрут, оптимальный с точки зрения всей сети.

Другой подход к межсетевой маршрутизации заключается в использовании маршрутизации от источника [54, 65, 69]. Хотя маршрутизация от источника имеет свои сложности, связанные, например, с необходимостью сбора подробной информации о топологии сети, именно она потенциально спо-

собна обеспечить расчет такого маршрута, вдоль которого QoS-требования гарантированно выполняются. Масштабируемость в этом случае обеспечивается за счет иерархического представления топологической информации [69].

Таким образом, хотя маршрутизация потенциально является одним из наиболее действенных механизмов в плане предоставления качества обслуживания, на практике в рамках существующих протоколов маршрутизации подобные функции остаются нереализованными в полной мере. В целом на основании выявленных недостатков существующих протоколов и с учетом перспективных концепций можно сформулировать требования к протоколу маршрутизации в современных СС. Во-первых, протокол маршрутизации должен отвечать концепции QoS-маршрутизации, т.е. оперировать не только номинальными, но и доступными сетевыми ресурсами, информация о которых должна обеспечиваться путем их постоянного мониторинга, а также обеспечивать маршрут не просто минимальной стоимости, а такой, вдоль которого гарантированно выполняются требования приложений как к показателям сетевой производительности, так и к показателям воспринимаемого качества обслуживания. Во-вторых, протокол маршрутизации должен обеспечивать сбалансированное использование сетевых ресурсов, что требует перехода от однопутевых к многопутевым стратегиям. В-третьих, задача маршрутизации должна решаться согласованно (в комплексе) с задачами управления доступом и резервирования ресурсов [69–70].

Основной функцией сетевого уровня ЭМВОС является маршрутизация информационных пакетов. Несмотря на то, что в современных протоколах маршрутизации большое внимание уделяется обеспечению качества обслуживания, алгоритмы, лежащие в их основе, не рассчитаны на целенаправленное внешнее деструктивное воздействие. Модификация алгоритмов маршрутизации позволит учесть эффект от воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС и тем самым повысить устойчивость НКСС.

1.4 Постановка задачи исследования

1.4.1 Выбор и обоснование показателя качества и критерия решения задачи

В соответствии с действующим в настоящее время ГОСТом [35] показателем устойчивости СС является значение вероятности связности ИНС $P_{св}$, под которым понимается вероятность того, что на заданном направлении существует хотя бы один путь, по которому возможна передача информации с требуемым качеством (QoS) и объемом:

$$P_{св} = P(k_{QoS} \geq 1 \mid \{Q_k\} \in \{Q_{треб}\}), \quad (1.1)$$

где k_{QoS} – количество работоспособных путей на заданном ИНС, обеспечивающих заданное качество обслуживания QoS; Q_k – качество обслуживания,

обеспечиваемое путями (путем) на заданном ИНС; $Q_{\text{треб}}$ – требуемый уровень качества обслуживания.

Как показано ранее, устойчивость транспортной наземно-космической сети ОСССН характеризуется вероятностью своевременной доставки пакета. В связи с этим, в работах [71, 72] проведен анализ методик расчета этого показателя для транспортных СС, осуществляющих передачу информационного трафика в соответствии с технологией АТМ, и предложено следующее аналитическое выражение:

$$P_{\text{СД}} = P_{\text{пр}} K_{\Gamma} P_{\text{св}} \left| T_{\text{дост}} \leq T_{\text{дост}}^{\text{зад}} \right. , \quad (1.2)$$

где $P_{\text{пр}}$ – вероятность безошибочной доставки пакета; $P_{\text{св}}$ – вероятность связности ИНС; K_{Γ} – коэффициент готовности ИНС; $T_{\text{дост}}^{\text{зад}}$ – заданное значение максимального времени доставки пакета.

Вероятность безошибочной доставки пакета $P_{\text{пр}}$ определяется способностью применяемой системы помехоустойчивого кодирования обнаруживать и исправлять ошибки, возникающие при приеме информационного пакета. В рамках монографии сделано допущение о том, что ошибки, возникающие при приеме пакета, будут обнаруживаться и исправляться с помощью системы помехоустойчивого кодирования в полном объеме, т.е. $P_{\text{пр}} = 1$.

В соответствии с выражением (1.2) вероятность связности ИНС $P_{\text{св}}$ служит для описания способности структуры сети СС обеспечить связность графа, ее формализующего, в условиях исключения отдельных ребер (подавления отдельных КС) или вершин (приведение в неработоспособное состояние узлов связи) [36]. Кроме того, значение вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$ зависит от типа ИНС, построенного в СС используемым протоколом маршрутизации. Так, в случае если ИНС представляет собой последовательное соединение элементов (рис. 1.10), то, применяя известные выражения из теории надежности, получим вероятность связности ИНС $P_{\text{св}1}$, с учетом вероятности работоспособного состояния отдельных элементов $P_{\text{раб.эл.}v}$ [73]:

$$P_{\text{св}1} = \prod_{v=1}^{z_1} P_{\text{раб.эл.}v} . \quad (1.3)$$

Под элементом соединения понимается канал или узел связи, имеющий собственные значения устойчивости к воздействию внешних и внутренних ДФ, определяемых показателем вероятности работоспособного состояния $P_{\text{раб.эл.}v}$ в соответствии с методикой [36].

$$P_{\text{раб.эл.}v} = (1 - P_{\text{ИТВ}v}) (1 - P_{\text{РЭП}v}) (1 - P_{\text{ФП}v}) (1 - P_{\text{Отк}v}) , \quad (1.4)$$

где $P_{\text{ИТВ}i}$ – вероятность отказа элементов ИНС вследствие информационно-технических воздействий (ИТВ) [74]; $P_{\text{РЭП}i}$ – вероятность отказа вследствие воздействия средств РЭП количества КС в ИНС большего, либо равного величине реберной связности графа, формализующего ИНС; $P_{\text{ФП}i}$ – вероятность физического поражения узлов связи ИНС большего, либо равного ве-

личине вершинной связности графа, формализующего ИНС; $P_{отк i}$ – вероятность отказа элементов ИНС вследствие воздействия внутренних ДФ и естественных процессов надежности.

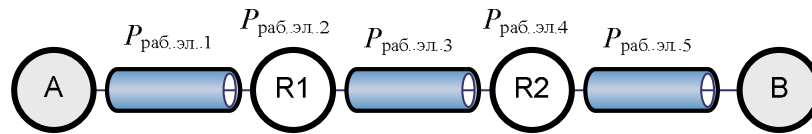


Рис. 1.10 – ИНС с последовательным соединением элементов

В случае независимости элементов и возможности осуществлять резервирование путей, ИНС имеет вид, представленный на рис. 1.11.

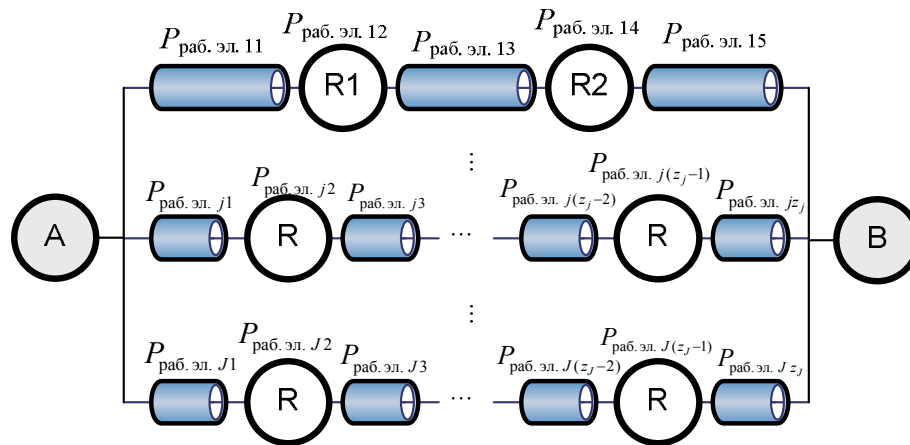


Рис. 1.11 – ИНС с параллельно-последовательным соединением элементов

В случае независимости элементов путей в ИНС и отсутствии пересечений, применяя известные выражения из теории надежности, получим суммарную вероятность связности для такой структуры ИНС $P_{св 2}$ [73]:

$$P_{св 2} = 1 - \prod_{j=1}^J \left(1 - \prod_{v=1}^{z_j} P_{раб.эл.v} \right). \quad (1.5)$$

В случае смешанной структуры путей, в том числе при наличии их пересечений, получим структуру, представленную на рис. 1.12. Для такой структуры путей в составе ИНС применяется его разбиение на отдельные последовательно объединенные области, с последующим вычислением вероятности связности $P_{св}$ сначала внутри такой области, затем в целом за ИНС.

На практике вид, представленный на рис. 1.12, имеют ИНС, используемые протоколами PNNI в сетях MPLS (ATM, ASON, IP-MPLS), разбитых на множество доменов маршрутизации. При этом каждая область соответствует отдельному домену, а маршрутизаторы, в которых пересекаются пути, соответствуют граничным маршрутизаторам. Дополнительные пути в каждом домене для схем соединений на рис. 1.11 и 1.12 соответствуют принципу резервирования соединений 1 + 1 или 1:1 [75].

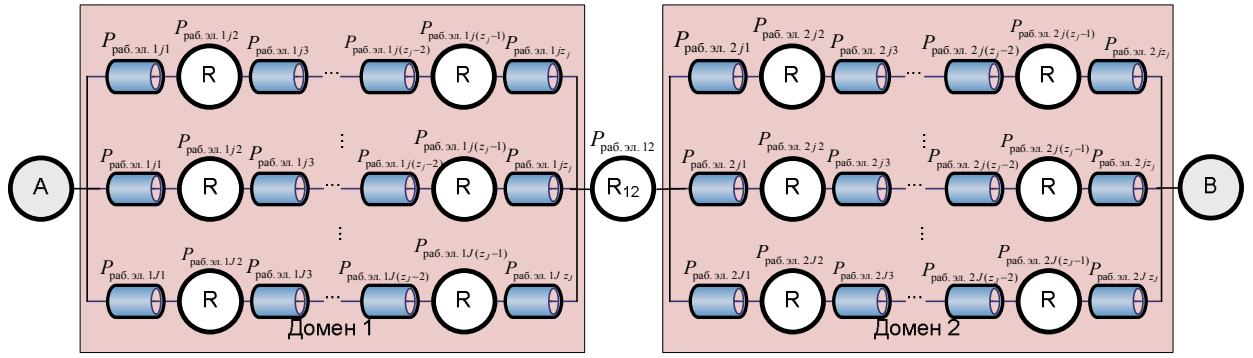


Рис. 1.12 – ИНС со смешанной структурой

На основе известных выражений из теории надежности с учетом выражений (1.4) и (1.5) получим суммарную вероятность связности для такой структуры ИНС $P_{св 3}$:

$$P_{св 3} = \prod_{i=1}^d \left(1 - \prod_{j=1}^{J_i} \left(1 - \prod_{v=1}^{z_j} P_{раб. эл. v} \right) \right) \cdot \prod_{i=1}^{d-1} P_{раб. эл. v}, \quad (1.6)$$

где первая часть произведения определяет вероятность связности доменов, а вторая – вероятность связности граничных маршрутизаторов.

Существенную роль в определении вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ играют временные параметры функционирования ИНС и его реакции на отказ элементов, определяемые коэффициентом готовности ИНС $K_{Г}$. Выражение для коэффициента готовности ИНС должно определять не только долю времени работоспособного состояния ИНС при отказе его отдельных элементов с учетом времени на восстановление элементов, но и время реакции протокола сигнализации на диагностику отказа и восстановление связи (или реконфигурацию). Кроме того, для современных протоколов маршрутизации само понятие отказа КС несколько отличается от принятого. Протоколы реагируют не только на полную утерю работоспособности элементом, но и на частичное понижение его характеристик, приводящее к превышению времени доставки пакета заданного значения $T_{дост}^{зад}$. Таким образом, особенности функционирования СС на сетевом уровне ЭМВОС при маршрутизации информационных потоков проявляются в форме зависимости значения коэффициента готовности ИНС $K_{Г}$ от временных интервалов сигнализации и временных параметров отказов КС:

$$K_{Г} = F(T_{диагн}, T_{ож}, T_{рек}, T_{отк КС}), \quad (1.7)$$

где $T_{отк КС}$ – среднее время работы между отказами КС, $T_{диагн}$ – время диагностики отказа ИНС; $T_{ож}$ – время ожидания восстановления связи в ИНС, $T_{рек}$ – время реконфигурации путей в ИНС.

Вербально задача исследования формулируется как повышение устойчивости транспортной наземно-космической сети ОСССН по показателю вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ за счет разработки НМА маршрутизации информационных потоков, позволяющих повысить коэффи-

циент готовности ИНС. В математическом виде задача формализуется следующим образом.

Дано:

$$P_{\text{СД}} = P_{\text{пр}} K_{\Gamma} P_{\text{св}} \Big| T_{\text{дост}} \leq T_{\text{дост}}^{\text{зад}},$$

$$E_y = \left(\frac{P_{\text{СД}2}}{P_{\text{СД}1}} - 1 \right) \times 100\% = \left(\frac{K_{\Gamma 2}}{K_{\Gamma 1}} - 1 \right) \times 100\%,$$

$$K_{\Gamma} = F(T_{\text{диагн}}, T_{\text{ож}}, T_{\text{рек}}, T_{\text{отк КС}}),$$

$$P_{\text{СД}}^{\text{зад}} = 0,9 \Big| T_{\text{дост}}^{\text{зад}} = 3 \text{ с.}$$

Найти:

$$\left(T_{\text{диагн}}, T_{\text{ож}}, T_{\text{рек}} \right) \left[\begin{array}{l} P_{\text{СД}} \geq P_{\text{СД}}^{\text{зад}} \Big| T_{\text{дост}}^{\text{зад}} \leq 3 \text{ с.} \\ E_y \rightarrow \max \end{array} \right. , \quad (1.8)$$

где $P_{\text{СД}}$ – вероятность своевременной доставки пакета; $T_{\text{дост}}$ – максимальное время доставки пакета; $T_{\text{дост}}^{\text{зад}}$ – заданное значение максимального времени доставки пакета; $P_{\text{СД}1}$ – вероятность своевременной доставки пакета без использования разработанных алгоритмов; $P_{\text{СД}2}$ – вероятность своевременной доставки пакета с использованием разработанных алгоритмов; $P_{\text{св}}$ – вероятность связности ИНС; $P_{\text{пр}}$ – вероятность безошибочной доставки пакета; K_{Γ} – коэффициент готовности ИНС; $K_{\Gamma 1}$ – коэффициент готовности ИНС без использования разработанных алгоритмов; $K_{\Gamma 2}$ – коэффициент готовности ИНС с использованием разработанных алгоритмов; E_y – показатель эффективности использования разработанных алгоритмов; $T_{\text{отк КС}}$ – среднее время между отказами КС; $T_{\text{диагн}}$ – время диагностики отказа ИНС; $T_{\text{ож}}$ – время ожидания восстановления связи в ИНС; $T_{\text{рек}}$ – время реконфигурации путей в ИНС.

Показатель эффективности использования разработанных алгоритмов E_y отражает прирост значения коэффициент готовности ИНС K_{Γ} вследствие использования разработанных элементов НМА маршрутизации информационных потоков.

1.4.2 Рамки исследований

1. Наземно-космическая сеть связи – транспортная наземно-космическая сеть ОСССН в составе 3-х ЦССС и 4-х КАС на ГСО, соединенных с помощью межспутниковых линий связи (МЛС) (рис. 1.2).

2. Уровень ЭМВОС, на котором рассматривается функционирование транспортной наземно-космической сети ОСССН – сетевой.

3. Ограничения по технологии связи – асинхронная передача данных в соответствии с технологией АТМ.

4. Ограничения по рассматриваемому протоколу маршрутизации – протокол PNNI.

5. Ограничения по рассматриваемому протоколу сигнализации – протокол Hello.

Выводы по первому разделу

1. В рамках создаваемой в настоящее время ОСССН ведется разработка КЭ, состоящего из орбитальной группировки КАС и земных станций, которая по своим возможностям и характеристикам должна соответствовать современным требованиям по своевременности, устойчивости и безопасности. При этом КАС на ГСО будут интегрированы в состав транспортной наземно-космической сети ОСССН, и при передаче информационного трафика будет использоваться технология пакетной передачи данных АТМ. Таким образом, актуальным является исследование вопросов устойчивости перспективной транспортной наземно-космической сети ОСССН, построенной на основе технологии АТМ, к воздействию ДФ, влияющим на СВС.

2. В силу своих специфических особенностей транспортная наземно-космическая сеть ОСССН уязвима к воздействию средств РЭП, которые в настоящее время активно развиваются, при этом воздействию будут подвергаться как КАС, так и ЦССС. Перспективные средства РЭП будут активно использовать структурные (имитационные) и дезинформирующие помехи, эффекты от воздействия которых проявляются не только на физическом и канальном, но и на сетевом уровне ЭМВОС.

3. Способы и средства обеспечения помехозащищенности связи в транспортной наземно-космической сети ОСССН ориентированы на физический (ППРЧ, система автоматического регулирования выходной мощности передатчиков) и канальный (помехоустойчивое кодирование) уровни ЭМВОС, в то время как на сетевом уровне, в достаточно отдаленной перспективе, предполагается лишь организация автоматической повторной передачи пакетов в случае их потери. Вместе с тем, наличие системы мониторинга сигнально-помеховой обстановки, создаваемой для повышения эффективности работы системы ППРЧ, делает возможным разработку комплекса средств помехозащиты сетевого уровня ЭМВОС, для функционирования которых могут использоваться данные этого мониторинга.

4. Понятие устойчивости связи и методы ее оценивания определяются соответствующими руководящими документами. В условиях, когда воздействие внутренних ДФ, влияющих на надежность СС, в достаточной мере формализовано, а вероятность воздействия оружия противника на инфраструктуру транспортной наземно-космической сети ОСССН (свойство живучести) намного ниже, нежели вероятность воздействия средств РЭП, особую важность для повышения устойчивости НКСС, как комплексного свойства, приобретает повышение помехозащищенности.

5. В настоящее время эффекты от воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС недостаточно изучены. Тем не менее, ряд работ, посвященных разработке элементов НМА в данной области, указывают на принципиальную возможность подавления сетей связи на сетевом уровне ЭМВОС. Для разработки адекватных мер противодействия угрозе подобного подавления необходимо проанализировать функции сетевого уровня ЭМВОС применительно к их использованию для повышения помехозащищенности, а следовательно, и устойчивости НКСС.

6. Основной функцией сетевого уровня ЭМВОС является маршрутизация информационных пакетов. Несмотря на то, что современные протоколы маршрутизации содержат множество различных механизмов обеспечения качества обслуживания, алгоритмы, лежащие в их основе, не рассчитаны на целенаправленное внешнее деструктивное воздействие. Модификация алгоритмов маршрутизации позволит учесть эффект от воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС и тем самым повысить устойчивость НКСС.

7. Проведена формализация решаемой задачи повышение устойчивости транспортной наземно-космической сети ОСССН по показателю вероятности своевременной доставки пакета $P_{СД}$ за счет разработки НМА маршрутизации информационных потоков, позволяющих повысить коэффициент готовности ИНС. Критерием решения поставленной научной задачи является обеспечение функционирования алгоритмов маршрутизации и сигнализации с обоснованными временными параметрами диагностики отказов в каналах связи НКСС в интересах достижения значения вероятности своевременной доставки пакета $P_{СД}$ не менее заданного $P_{СД}^{зад} = 0,9 | T_{дост}^{зад} = 3$ с, при максимально возможном значении показателя эффективности использования разработанных алгоритмов сигнализации и маршрутизации E_y .

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ МАРШРУТИЗАЦИИ В НКСС

2.1 Обоснование направлений повышения устойчивости НКСС на сетевом уровне ЭМВОС в условиях воздействия средств РЭП

Как показал анализ, проведенный в п. 1.2, в настоящее время отсутствуют элементы НМА, позволяющие оценивать эффект от воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС. Данное обстоятельство обуславливает необходимость формализации зависимости показателей функционирования сетевого уровня ЭМВОС от тех показателей физического уровня ЭМВОС, изменение которых является следствием воздействия средств РЭП. Использование этих зависимостей при модификации алгоритмов маршрутизации позволит учесть эффект от воздействия средств РЭП на физический уровень ЭМВОС на сетевом уровне ЭМВОС.

Ввиду того, что НКСС будет использовать ресурс космического эшелона ОСССН, в котором передача информационных потоков ведется по технологии АТМ, именно данная технология и будет рассматриваться в дальнейшем.

Процесс маршрутизации в технологии АТМ достаточно полно описан в работах [76, 77]. Особенностью технологии АТМ является то, что протокол маршрутизации PNNI выполняет не только функцию поиска кратчайших путей на этапе установления соединений между источником и получателем данных, но и выявление отказов КС сети на этапе собственно передачи этих данных путем периодического обмена служебными пакетами между соседними коммутаторами. При поиске кратчайших путей в протоколе PNNI применяется алгоритм Дейкстры, в то время как порядок обмена служебными пакетами определяется протоколом Hello. Обобщенная схема маршрутизации в технологии АТМ представлена на рис. 2.1.

Таким образом, можно выделить два основных направления совершенствования механизмов маршрутизации в протоколе PNNI для повышения устойчивости НКСС на основе технологии АТМ в условиях воздействия средств РЭП:

- модификация алгоритма Дейкстры;
- модификация алгоритма, лежащего в основе протокола обмена служебными пакетами Hello.

Алгоритм Дейкстры, предложенный в 1959 г. [78], считается одним из наиболее эффективных алгоритмов решения задачи поиска кратчайших путей. При осуществлении поиска каждому ребру присваивается определенный вес, соответствующий метрике КС, формализуемого им, значение которой рассчитывается протоколом маршрутизации. Порядок расчета метрики КС в технологии АТМ приведен в п. 2.2.

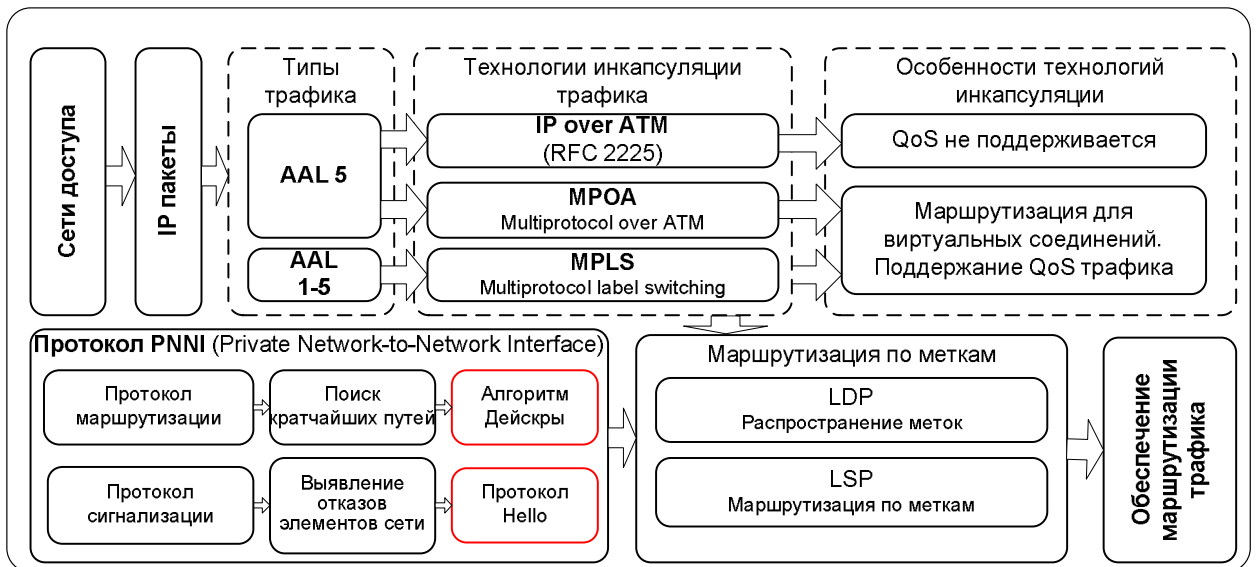


Рис. 2.1– Обобщенная схема маршрутизации в технологии ATM

При описании алгоритма введены следующие обозначения:

$G(U, V)$ – граф сети;

n – количество вершин в графе;

$i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n$ – переменные, счетчики вершин;

U_1 – начальная вершина;

$V(U_i, U_j)$ – вес ребра, соединяющего i -ю и j -ю вершины;

d_i – расстояния от вершины U_1 до вершины U_i ;

t – переменная, определяющая последнюю помеченную вершину;

P – множество помеченных вершин;

$D = \{d_i\}, i = 1, \dots, n$ – множество расстояний до помеченных вершин от начальной вершины.

Шаг 1. Перед началом выполнения алгоритма все вершины и дуги не помечены. Каждой вершине в ходе выполнения алгоритма присваивается число d_i , равное длине кратчайшего пути из вершины U_1 в вершину U_i , включающего только помеченные вершины. Положить $d_1 = 0$ и $d_i = \infty, i = 2, \dots, n$. Пометить вершину U_1 и положить $t = U_1$.

Шаг 2. Для каждой непомеченной вершины $U_i, i = 2, \dots, n$ следующим образом пересчитать величину d_i ,

$$d_i = \min \{ d_i, d_t + V(t, U_i) \}, \quad (2.1)$$

где $V(t, U_i)$ – вес ребра, соединяющего последнюю из помеченных вершин t и непомеченную вершину U_i .

Если $d_i = \infty$ для всех непомеченных вершин U_i , закончить процедуру алгоритма: в исходном графе отсутствуют пути из вершины U_1 в непомеченные вершины. В противном случае пометить ту из вершин U_i , для которой величина d_i является наименьшей. Положить $t = U_i$.

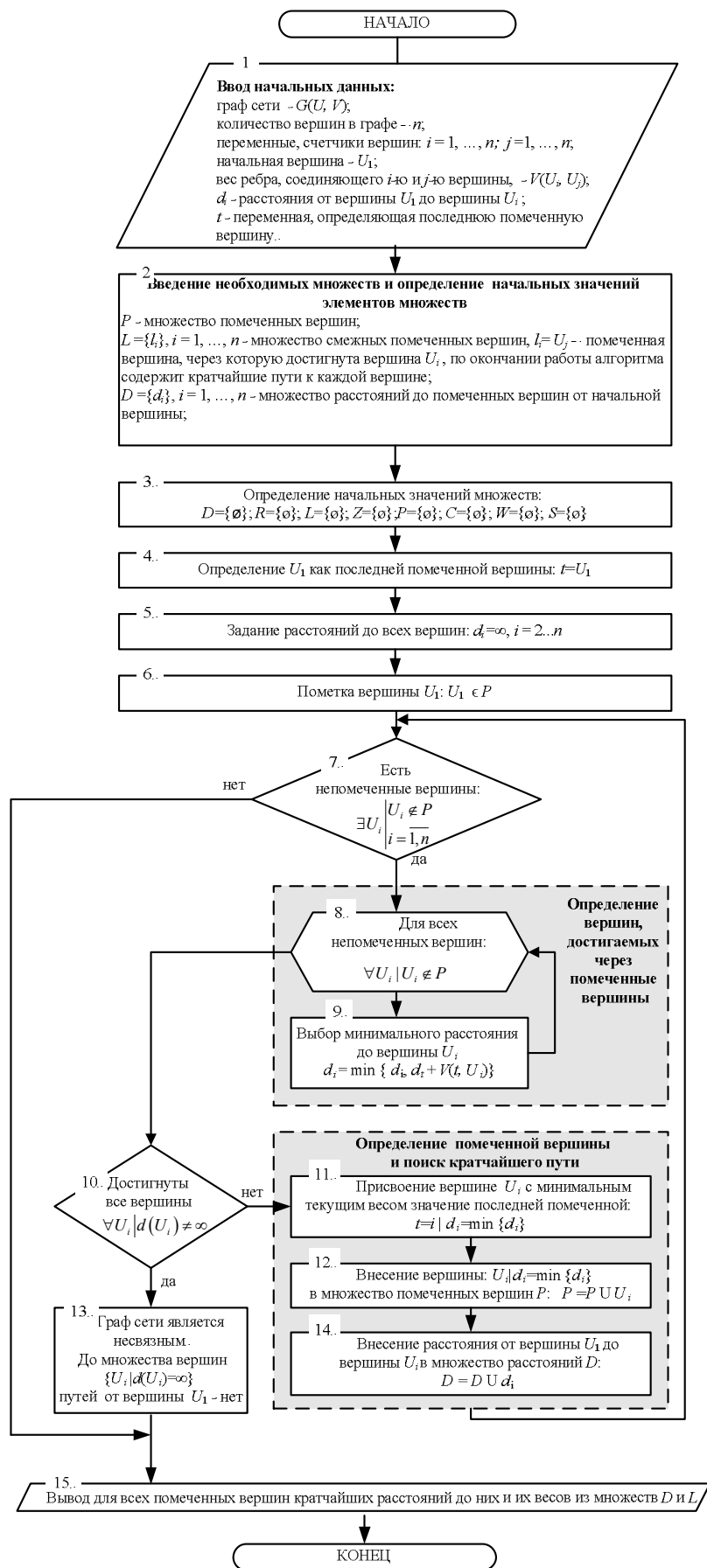


Рис. 2.2 – Алгоритм Дейкстры

Шаг 3. Если не выполняется условие:

$$\exists U_i \left| \begin{array}{l} U_i \notin P \\ i = \overline{1, n} \end{array} \right.,$$

закончить процедуру; кратчайший путь из вершины U_1 в вершины U_i найдены. В противном случае перейти к **шагу 2**.

Следует отметить, что каждый раз, когда помечается некоторая вершина (не считая вершины U_1), помечается ребро, являющееся входящим в данную вершину. Таким образом, на любом этапе алгоритма в каждую вершину заходит не более чем одно помеченное ребро. Следовательно, можно сделать вывод о том, что помеченные ребра образуют в исходном графе дерево с корнем в вершине U_1 , называемое деревом кратчайших путей.

Единственный путь от вершины U_1 до любой вершины U_i , принадлежащей дереву кратчайших путей, является кратчайшим путем между указанными вершинами.

Если кратчайшему пути из вершины U_1 в вершину U_i в дереве кратчайших путей принадлежит вершина t , то часть этого пути, заключенная между U_i и t , является кратчайшим путем между этими вершинами. Действительно, если бы между вершинами U_i и t существовал более короткий путь, то упомянутый выше путь между вершинами U_1 и U_i не мог бы быть кратчайшим. Поскольку на всех этапах алгоритма Дейкстры помеченные ребра образуют в исходном графе дерево, алгоритм можно рассматривать как процедуру наращивания дерева с корнем в вершине U_1 . Когда в этой процедуре наращивания не остается непомеченных вершин, процедура может быть остановлена.

Особенностью алгоритма Дейкстры является то, что помеченные ребра не могут образовать в исходном графе цикл, так как в алгоритме не может помечаться ребро, концевые вершины которого уже помечены. Применительно к поиску кратчайших путей при маршрутизации это означает, что резервирование кратчайшего пути может быть осуществлено только при повторном применении алгоритма Дейкстры на графе, формализующем исходную сеть, при удалении ребер, входящих в определенный до того кратчайший путь. Например, такой вариант рассмотрен в работе [6].

Принцип работы протокола Hello предусматривает нахождение коммутатора АТМ в одном из четырех состояний (рис. 2.3).

В работоспособном состоянии соседние коммутаторы обмениваются служебными пакетами Hello с периодичностью, определяемой временем диагностики отказа ИНС ($T_{\text{диагн}}$). При отказе КС коммутатор переходит в состояние отказа, однако установить этот отказ может лишь благодаря тому, что время диагностики отказа ИНС $T_{\text{диагн}}$ истекло, а служебный пакет Hello от соседнего коммутатора не поступил. Возможен кратковременный отказ КС, при котором за время $T_{\text{диагн}}$ КС успевает и отказать, и восстановиться. В случае, если подобное восстановление не произошло, коммутатор переходит в состояние ожидания, в котором продолжает передачу информации и служеб-

ных пакетов Hello в расчете, что произошла потеря самого служебного пакета в работоспособном канале связи (ложный отказ).

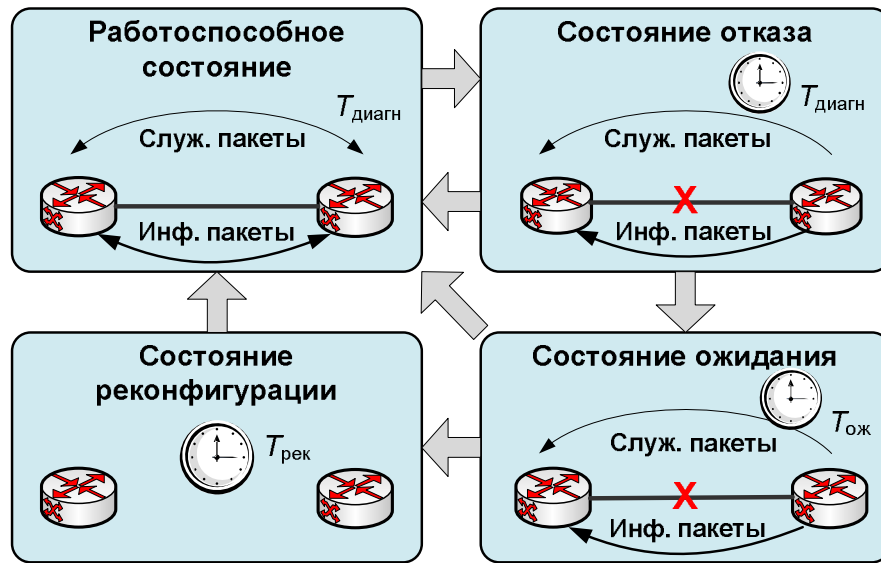


Рис. 2.3 – Возможные состояния коммутатора АТМ

В состоянии ожидания коммутатор находится в течение времени ожидания восстановления связи в ИНС ($T_{\text{ож}}$), после чего либо поступает служебный пакет Hello, и осуществляется переход в работоспособное состояние, либо принимается решение об отказе КС, и коммутатор переходит в состояние реконфигурации. В состоянии реконфигурации, длящегося в течение времени реконфигурации путей в ИНС ($T_{\text{рек}}$), прекращается отправка информационных пакетов по отказавшему КС, производится уведомление об отказе КС узла, ответственного за изменение конфигурации путей, поиск новых путей и обновление таблицы маршрутизации, а также переключение на эти новые пути, после чего коммутатор переходит в работоспособное состояние и начинает от отправку информационных пакетов согласно обновленной таблице маршрутизации. Время реконфигурации путей в ИНС зависит $T_{\text{рек}}$, главным образом, от масштаба сети. Временные интервалы диагностики и ожидания определяются конфигурацией протокола Hello. По умолчанию протокол PNNI устанавливает следующие временные интервалы сигнализации: $T_{\text{диагн}} = 15$ с, $T_{\text{ож}} = 75$ с.

В работах [79–84] производилось исследование влияния длительности времени диагностики на различные параметры сетевого уровня. Анализ этих работ показал, что увеличение времени диагностики отказа ИНС $T_{\text{диагн}}$ позволяет снизить интенсивность служебного трафика (рис. 2.4), но, вместе с тем, увеличение данного интервала приводит к росту числа потерянных заявок на обслуживание (рис. 2.5) и снижению степени адекватности таблиц маршрутизации (рис. 2.6), которая определяется отношением количества маршрутов, на момент обращения имеющих метрику, совпадающую с метрикой, записанной в маршрутной таблице, к количеству устаревших вследствие отказа КС маршрутов.

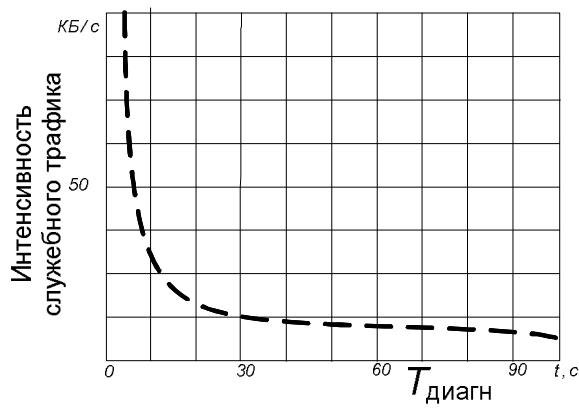


Рис. 2.4 – Зависимость интенсивности служебного трафика от времени диагностики отказа ИНС

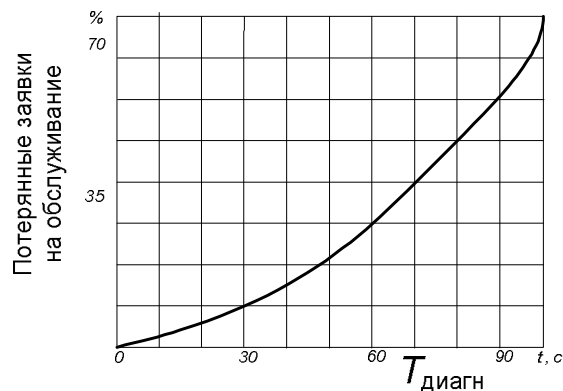


Рис. 2.5 – Зависимость числа потерянных заявок на обслуживание от времени диагностики отказа ИНС

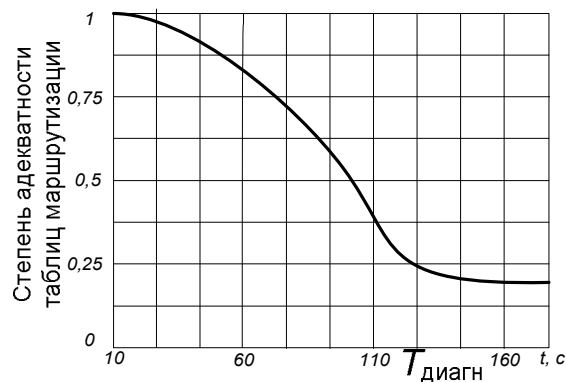


Рис. 2.6 – Зависимость степени адекватности таблиц маршрутизации от времени диагностики отказа ИНС

Таким образом, одним и наиболее перспективных направлений модификации алгоритма, лежащего в основе протокола Hello, является задание таких значений времени диагностики $T_{\text{диагн}}$ и времени ожидания $T_{\text{ож}}$, которые бы обеспечили необходимое значение коэффициента готовности ИНС K_{Γ} с учетом временных параметров воздействия средств РЭП на КС и, в соответствии с выражением (1.8), требуемое значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}$.

2.2 Модель функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП

Для обеспечения высокой помехоустойчивости современных радиоканалов связи используются сигналы с различными видами модуляции и помехоустойчивого кодирования с переменной скоростью, схемы применения которых адаптируются к сигнально-помеховой обстановке в интересах достижения максимальной битовой скорости передачи в текущих условиях. Вместе с тем, в работах [85–87] показано, что варьирование эффективной битовой пропускной способности отдельных каналов связи негативно влияет на функционирование протоколов маршрутизации сетевого уровня. Такое негативное влияние обусловлено жесткой реакцией протоколов маршрутизации на изменение метрики отдельных каналов связи в составе сети. При обнаружении такого изменения протокол маршрутизации прекращает передачу информации, оповещает смежные маршрутизаторы об изменении метрики отдельных каналов в сети и пересчитывает топологию сети в соответствии с новой метрикой канала. Как показано в п. 1.2.1, транспортная наземно-космическая сеть ОСССН будет подвержена воздействию различных средств РЭП, однако в условиях априорной неизвестности конкретного вида и интенсивности помех необходимо определить наихудший возможный вариант сигнально-помеховой обстановки. С этой целью необходимо провести анализ организованных радиопомех, которые могут быть использованы противником.

Для создания организованных радиопомех применяются специальные средства и устройства (станции и передатчики радиопомех, дипольные, угловые и линзовые отражатели, радиолокационные и ИК-ловушки и др.). Создание помех возможно также преднамеренным воздействием на среду распространения электромагнитных волн, принимаемых радиоэлектронными средствами (РЭС). В результате воздействия на среду могут возникать искусственные локальные или протяженные образования (например, искусственные ионизированные области в атмосфере), параметры которых отличаются от параметров окружающей среды распространения электромагнитного излучения от источника к приемному устройству [88, 89].

Организованные радиопомехи можно классифицировать [89] по:

- способу формирования;
- конечному результату (эффекту) воздействия на РЭС;
- соотношению ширины спектра помехового сигнала и полосы пропускания подавляемого канала РЭС;
- классам и назначению подавляемых РЭС;
- способам создания и т.д.

В зависимости от способа формирования (образования) организованные радиопомехи могут быть [89]:

- активными;
- пассивными;
- комбинированными (активно-пассивными).

Активные организованные радиопомехи создаются специальными передатчиками или станциями радиопомех, излучающими помеховые сигналы той или иной структуры.

По структуре (закону изменения параметров во времени) помеховые сигналы могут быть [89]:

- детерминированными (неслучайными) или случайными;
- непрерывными или импульсными;
- немодулированными или модулированными.

Детерминированные помеховые сигналы – сигналы, описываемые определенной функцией времени. Это, например, непрерывные немодулированные высокочастотные синусоидальные колебания, непрерывные синусоидальные колебания, модулированные по амплитуде синусоидальным колебанием.

Случайные помеховые сигналы – сигналы, параметры которых (или хотя бы один из параметров) изменяются во времени случайным образом, т.е. являются случайными функциями времени. Примером служат шумовые помеховые сигналы.

Непрерывные помеховые сигналы – это высокочастотные детерминированные или случайные колебания, непрерывно изменяющиеся во времени.

Импульсные помеховые сигналы представляют собой прерывистые во времени последовательности высокочастотных колебаний.

Параметры непрерывных (амплитуда, частота, фаза) и импульсных (амплитуда, длительность импульсов, временное положение относительно импульсов полезных сигналов) могут изменяться преднамеренно во времени по детерминированному или случайному закону в соответствии с законом изменения параметров модулирующего колебания. В этом случае помеховые сигналы называют модулированными.

Непрерывные модулированные помеховые сигналы в зависимости от модулируемого параметра подразделяют на амплитудно-, частотно- и фазомодулированные сигналы. Импульсные помеховые сигналы, параметры которых изменяются во времени по случайному закону, называют хаотическими импульсными помеховыми сигналами.

Выбор структуры помехового сигнала (при формировании в передатчиках или станциях помех при организации РЭП) противником осуществляется в зависимости от структуры построения приемного устройства и структуры полезного сигнала подавляемого РЭС, от требуемого (заданного) эффекта воздействия помехового сигнала (подавление полезного сигнала, маскировка полезного сигнала или его имитация и др.).

Активные радиопомехи используются для подавления РЭС.

Пассивные организованные радиопомехи возникают вследствие отражения (рассеяния) электромагнитной энергии, излучаемой РЭС, от искусственно (преднамеренно) создаваемых образований (облаков или протяженных полос дипольных отражателей, уголковых или линзовых отражателей, аэрозолей и др.). Помеховый сигнал, возникающий за счет отражения, чаще всего является случайным. Так, при отражении от облака дипольных отражателей результирующий помеховый сигнал, воздействующий на подавляемое РЭС, представляет собой сумму элементарных сигналов, отраженных каждым из диполей искусственного

образования, попавшим в поле зрения диаграммы направленности антенны подавляемого РЭС. Во всех практически возможных ситуациях искусственное образование в целом и каждый отражатель в отдельности перемещаются случайным образом относительно друг друга. За счет изменения пространственного положения амплитуды, фазы и частоты (доплеровские приращения частот) элементарных сигналов изменяются во времени по случайному закону. Случайным будет и результирующий помеховый сигнал, воздействующий на РЭС.

Структура (параметры) помехового сигнала, воздействующего на подавляемые РЭС, будет определяться структурой полезного сигнала РЭС, взаимным пространственным положением подавляемого РЭС, количеством элементарных отражателей, попавших в поле зрения диаграммы направленности антенны подавляемого РЭС [89].

Пассивные радиопомехи применяются для подавления радио- и оптико-локационных средств. При создании пассивных радиопомех могут решаться задачи маскировки или имитации сигналов.

Комбинированные (активно-пассивные) организованные радиопомехи образуются за счет отражения (рассеяния) электромагнитной энергии, излучаемой станцией радиопомех в направлении искусственного или естественного образования.

Структура помехового сигнала, воздействующего на подавляемое РЭС, определяется в этом случае структурой помехового сигнала станции помех, параметрами отражающего образования, взаимным пространственным положением источника облучения (станции помех), облучаемого образования и подавляемого РЭС, скоростью изменения взаимного пространственного положения и другими факторами.

В зависимости от конечного результата воздействия на РЭС активные и пассивные радиопомехи разделяются [89] на:

- маскирующие;
- имитирующие.

Маскирующие радиопомехи (маскирующие помеховые сигналы) создают на входе приемного устройства подавляемого РЭС мешающий фон (в дополнение к фону, образованному внутренними шумами приемника), который исключает или затрудняет получение полезной информации. Структура результирующего сигнала, действующего на входе приемника РЭС, может в значительной степени отличаться от структуры принимаемого полезного сигнала.

Маскирование может осуществляться:

- по параметрам полезного сигнала (амплитуде, несущей частоте, фазе, спектру);
- по параметрам местоположения дислоцируемого объекта (угловым координатам, дальности);
- по радиальной скорости движения (доплеровскому приращению частоты сигнала) и т.д.

В результате маскирования ухудшаются характеристики обнаружения (снижается вероятность правильного обнаружения или повышается вероятность ложной тревоги), ухудшаются разрешающая способность и точность определения параметров положения дислоцируемых объектов, затрудняется

выделение передаваемых сообщений (команд) в линиях радиосвязи и телеуправления, увеличиваются ошибки определения параметров сигналов разведываемых РЭС, вносятся ошибки или происходит срыв автоматического сопровождения цели (по направлению, дальности, скорости).

Эффективность маскирующих радиопомех зависит от частотной и временной структуры помехового и полезного сигналов и их энергетического соотношения на входе приемника подавляемого РЭС [89].

В качестве активных маскирующих радиопомех используются преимущественно непрерывные шумовые сигналы. Пассивные маскирующие радиопомехи создаются искусственными образованиями большой протяженности.

Имитирующие радиопомехи вносят ложную информацию при приеме и обработке сигналов, принимаемых РЭС. Значения параметров имитирующего помехового сигнала (поляризация, несущая частота амплитуды, вид модуляции и др.) обычно близки к значениям параметров полезных сигналов, используемых в РЭС для получения полезной информации. Имитирующие радиопомехи используются при радиоэлектронном подавлении РЭС связи, командных радиополитий управления [89].

В зависимости от соотношения ширины спектра радиопомехи и полосы пропускания подавляемого канала РЭС радиопомехи подразделяются [89] на:

- прицельные;
- заградительные.

Прицельными и заградительными радиопомехи могут быть по несущей частоте, по частоте модуляции несущего колебания (например, по частоте сканирования), по доплеровской частоте.

Прицельные радиопомехи по частоте характерны тем, что ширина их спектра соизмерима с шириной полосы пропускания подавляемого канала РЭС (при условии, что средняя частота помехового сигнала примерно равна резонансной частоте подавляемого канала). Так, прицельные радиопомехи по несущей частоте имеют ширину спектра, соизмеримую с шириной спектра полезного сигнала (шириной полосы пропускания приемника) подавляемого РЭС, а прицельные по доплеровскому приращению частоты отраженного сигнала – с шириной полосы пропускания узкополосного фильтра.

Заградительные радиопомехи имеют ширину спектра, существенно (в 10 и более раз) превышающую полосу пропускания подавляемого канала РЭС. При применении заградительных радиопомех имеется возможность одновременного подавления однотипных РЭС, работающих на близких несущих частотах (радиопомехи, заградительные по несущей частоте), или подавления соответствующих каналов РЭС при отсутствии точных данных об их параметрах (радиопомехи, заградительные по частоте сканирования, по доплеровскому приращению частоты) [88, 89].

При равных мощностях передатчиков радиопомех эффективность создания заградительных по частоте радиопомех ниже эффективности прицельных, так как спектральная плотность последних выше. Это означает, что при создании прицельных радиопомех обеспечивается более высокое отно-

шение мощности помехового сигнала к мощности полезного сигнала на выходе приемника РЭС и тем самым больший мешающий эффект воздействия.

Прицельными и заградительными радиопомехи могут быть и по другим параметрам: по направлению, дальности, поляризации, коду, длительности и периоду следования импульсов.

Радиопомехи можно классифицировать также по классам и назначению подавляемых РЭС или подавляемых каналов РЭС [88, 89]:

- помехи радио- и оптико-электронным средствам связи, навигации, локации, управления объектами;

- радиопомехи РЛС, работающими в режиме обзора или автоматического сопровождения цели и т.д.

Виды помеховых сигналов при подавлении РЭС различных классов и назначения, различных каналов отдельного РЭС могут существенно отличаться. Для подавления РЭС конкретного класса, назначения и типа с требуемой эффективностью зачастую необходимы не только определенные значения энергии помехового сигнала, но и определенная его структура, минимально необходимое количество источников помех и определенное пространственное положение относительно подавляемого средства, т.е. определенный способ создания радиопомех [88, 89].

Способ создания радиопомех (способ применения средств создания радиопомех) предусматривает применение таких видов помеховых сигналов (шумовых, непрерывных, детерминированных, случайных, модулированных по амплитуде, частоте и т.д.), а также действий (или последовательности действий), в результате которых обеспечивается требуемое снижение эффективности функционирования РЭС.

Современные устройства формирования преднамеренных помех обладают небольшими массогабаритными свойствами и могут излучать в нужном режиме и с требуемой мощностью в автоматическом или полуавтоматическом режиме любую из приведенных в табл. 2.1 помеху [90].

Таблица 2.1 – Классификация преднамеренных помех

По подавляемой полосе частот				
Прицельные	Скользящие		Гребенчатые	Заградительные
По амплитудно-временной огибающей				
Модулированные (частный случай – имитационные)			Немодулированные	
По амплитуде	По частоте	По фазе	Синусоидальные	Шумовые
По способу излучения				
Непрерывные			Импульсные	

Общая классификация помех приведена на рис. 2.7 [89].

Способ создания помех выбирается противником с учетом структуры и принципа функционирования подавляемого средства или системы. Влияние помех на эффективность функционирования РЭС вынуждает

противоборствующие стороны принимать меры, направленные, с одной стороны, на обеспечение устойчивого функционирования собственных РЭС в условиях радиопомех и, с другой стороны, на снижение эффективности функционирования РЭС противника путем создания радиопомех. При этом противоборствующие стороны стремятся применять радиопомехи в максимально возможной степени обеспечивающие снижение эффективности РЭС противника.

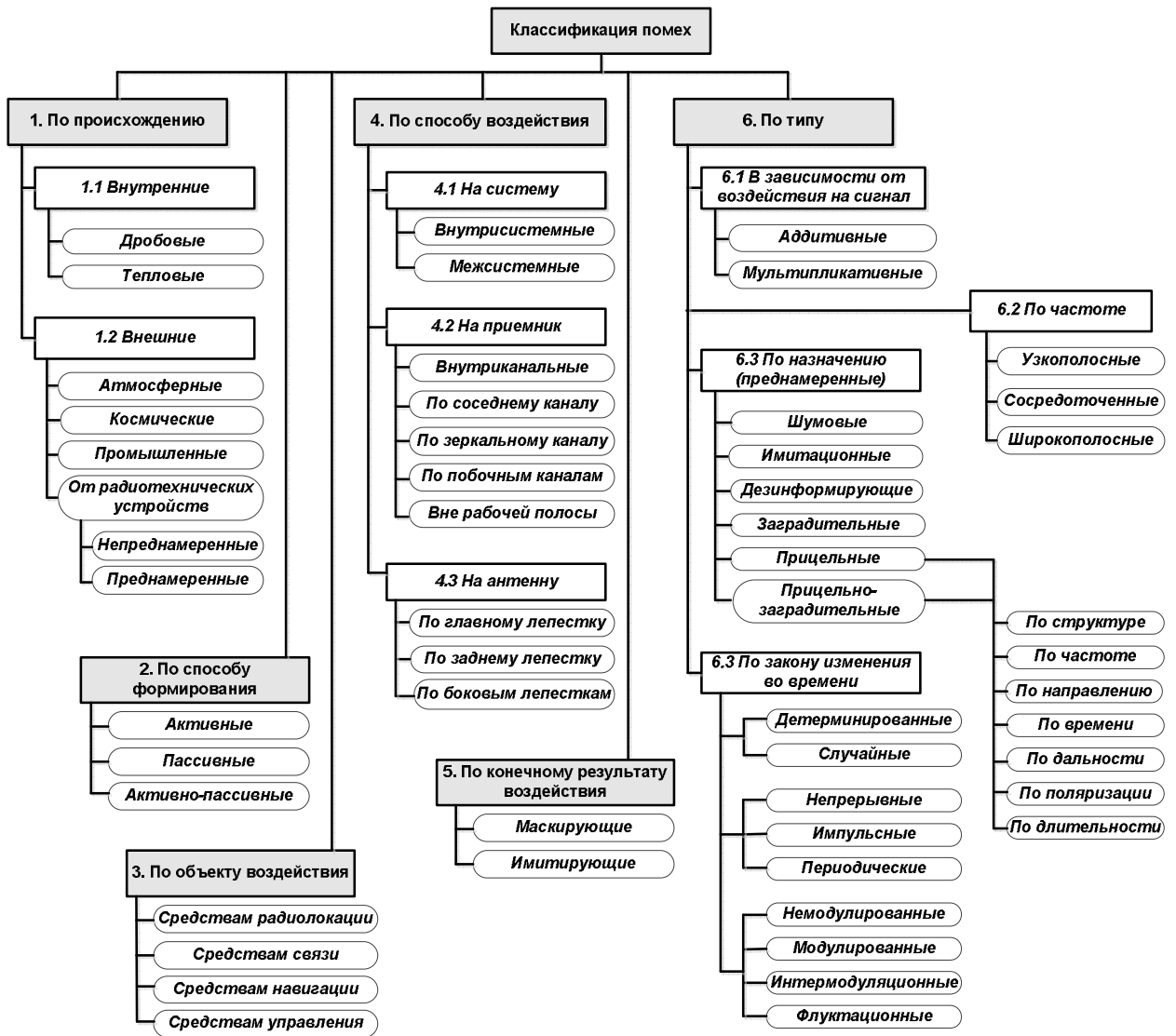


Рис. 2.7 – Общая классификация помех

Для подавления транспортной наземно-космической сети ОСССН, использующей, как это показано в п. 1.2, режим ППРЧ, могут применяться различные виды организованных помех. Основными видами помех, которые сравнительно просто реализуются в системах РЭП, являются (рис. 2.8):

- шумовая заградительная помеха;
- шумовая помеха в части полосы;
- полигармоническая помеха;
- ответная (ретранслированная) помеха.

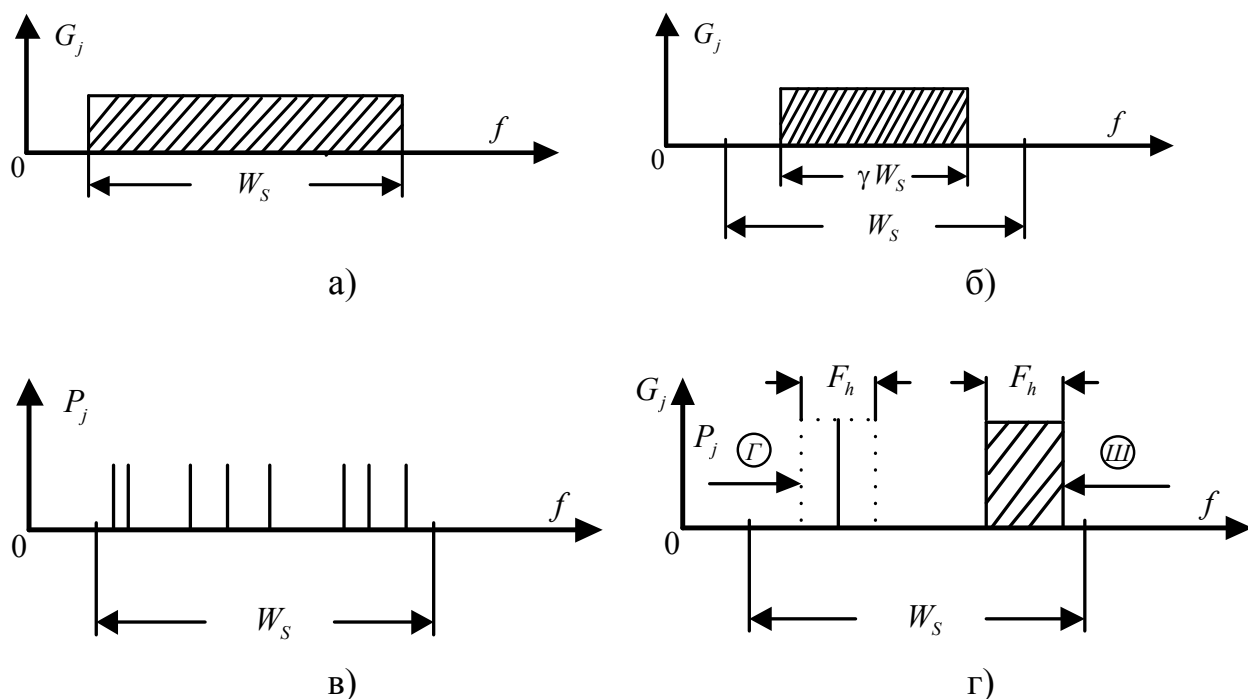


Рис. 2.8 – Основные виды помех, воздействующих на системы связи с ППРЧ

Виды помех реализуются в соответствующих станциях помех (СП). Все многообразие вариантов СП определяется в основном путями, которыми их разработчики стремятся сконцентрировать ограниченную мощность передатчиков в определенных частотных диапазонах, временных интервалах и пространственных секторах [88, 89].

Наиболее универсальной и устойчивой к различным способам помехоустойчивости является шумовая заградительная помеха (рис. 2.8, а), модель которой представляет собой ограниченный по полосе АБГШ со спектральной плотностью мощности G_j [88, 89]:

$$G_j = P_j / W_s.$$

Заградительная помеха должна перекрывать частотный диапазон средства радиосвязи (СРС) и при соответствующей мощности СП в состоянии подавить СРС при любых способах перестройки частоты. В виду значительного частотного диапазона СРС с ППРЧ мощность передатчика помех должна быть достаточно большой. В связи с этим СП заградительного вида представляет большую опасность с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) для других радиоэлектронных средств, работающих в том же диапазоне частот. При этом сама СП становится радиозаметной и, в силу этого, уязвимой целью для самонаводящихся по радиоизлучению ракет [88]. Вследствие этого, применение заградительной помехи обосновано лишь в период доразведки СРС, с целью определения параметров протоколов физического, канального и сетевого уровней.

Мощность шумовой помехи может быть использована более эффективно за счет сосредоточения ее в ограниченной полосе частот, значительно

меньшей, чем диапазон частот СРС с ППРЧ. Такую помеху принято называть шумовой помехой в части полосы (сосредоточенной по спектру помехой, помехой с частичным перекрытием спектра сигналов СРС) – рис. 2.8, б. Спектральная плотность мощности шумовой помехи в части полосы G может быть представлена в виде двух уровней [88, 89]:

$$G_j = \begin{cases} P_j / (\gamma W_s); & \text{в полосе } (\gamma W_s) \\ 0; & \text{в полосе } (1 - \gamma) W_s, \end{cases}$$

где γ – коэффициент, характеризующий часть полосы, занимаемую помехой, $0 < \gamma < 1$.

Спектральная плотность мощности шумовой помехи в части полосы возрастает в $1/\gamma$ раз по сравнению со спектральной плотностью мощности шумовой заградительной помехи. Станция шумовых помех с равномерно распределенной мощностью в пределах полосы γW_s подавляет частотные элементы сигнала с ППРЧ с вероятностью γ . Вероятность того, что эти же частотные элементы сигнала с ППРЧ не подавляются помехой равна $(1 - \gamma)$.

В работе [91] рассматриваются возможности трехуровневой шумовой помехи, спектральная плотность мощности которой:

$$G_j = \begin{cases} P_{j1} / (\gamma_1 W_s); & \text{в полосе } (\gamma_1 W_s) \\ P_{j2} / (\gamma_2 W_s); & \text{в полосе } (\gamma_2 W_s) \\ 0; & \text{в полосе } (1 - \gamma_1 - \gamma_2) W_s, \end{cases}$$

где P_{j1}, P_{j2} – мощность помехи большего и меньшего уровней, соответственно; за счет выбора значений P_{j1} и $P_{j2} = P_j - P_{j1}$ такая помеха имеет дополнительную степень свободы.

Трехуровневая помеха является эффективной для схем приема, сигналов с тестом порога отношения сигналов, соответствующих символам 1 и 0, и стиранием символов, подверженных воздействию помех [88, 91].

С целью повышения эффективности СП спектр шумовой помехи в части полосы целесообразно скачкообразно по случайному закону перемещать по всему диапазону частот, занимаемому СРС с ППРЧ. При данной модели помехи для любого отношения сигнал-помеха P_s/P_j имеет место оптимальное значение γ_{opt} соответствующее максимальному значению подавляемой полосы частот при которой помехоустойчивость СРС будет минимальной. Помеха с такими параметрами является наихудшей для СРС. С целью текущей оптимизации ширины спектра помехи в части полосы и мощности помехи в СП необходимо иметь станцию РТР для измерения параметров сигналов подавляемых СРС [88, 89].

Для СРС с ППРЧ эффективной помехой при определенных условиях является полигармоническая помеха (многотональная помеха), представляющая собой набор из l немодулированных гармонических колебаний равной мощности, распределенных по диапазону частот W_s в соответствии с заданной постановщиком помех стратегией рис. 2.8, в.

$$J(t) = \sum_{i=1}^l \sqrt{\frac{2P_{\text{общ}}}{l}} \cos(\omega_{ji}t + \varphi_{ji}).$$

Для создания эффективной полигармонической помехи требуется достаточно точное наведение узкополосных помех на центральные частоты каналов СРС с ППРЧ, а также обеспечение на входе i -го канала приемника СРС определенного соотношения мощности помехи P_i и мощности сигнала P_s :

$$\frac{P_j}{l} = \frac{P_s}{\alpha},$$

где α – некоторое положительное число (параметр распределения мощности), выбираемое постановщиком помех в соответствии с заданной стратегией таким образом, чтобы оптимизировать эффективность помехи [88, 89].

Следует заметить, что эффективность гармонической помехи, действующей в том же канале, в котором находится и сигнал, зависит от разности фаз между помехой и сигналом. При неблагоприятных фазовых соотношениях и равенстве $P_j = P_s$ помеха может полностью подавить полезный сигнал [88, 89].

Средняя мощность передатчика полигармонической помехи в случае равномерного распределения узкополосных помех по всем частотным каналам диапазона СРС должна быть в M_f раз больше мощности полезного сигнала. Таков энергетический выигрыш СРС с ППРЧ при воздействии на нее полигармонической помехи. В простейшей одноканальной СРС с ППРЧ доля частотных каналов, пораженных полигармонической помехой $1/M_f$. В этом случае одна гармоническая помеха при воздействии на СРС с ППРЧ, имеющей, например 10^3 каналов, может привести к появлению ошибки с вероятностью 10^{-3} , что явно недопустимо при цифровой передаче информации [91].

Анализ выполнен в виде обобщения частных результатов изложенных в работах [92, 93]. Нижеуказанные математические соотношения и графические зависимости приведены в работе [92].

Эффективность воздействия шумовых помех в части полосы определяется средней вероятностью ошибочного приема сигнала или средней вероятностью ошибки (СВО) на символ – P_E . и в случае передачи сигналов по КС с ППРЧ определяется как [92, 93]:

$$P_E = \frac{1}{2} \gamma e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{G_0}{E_s} + \frac{P_j}{\gamma K_s P_s} \right)^{-1}} + \frac{1}{2} (1 - \gamma) e^{-\frac{E_s}{2G_0}},$$

где E_s – энергия сигнала, в данном случае энергия информационного бита ($E_s = P_s T_b$); γ – коэффициент, определяющий часть полосы сигнала с ППРЧ, занимаемой помехой; G_j – спектральная плотность мощности помехи в полосе частот W_s ($G_j = P_j / W_s$); P_j – мощность помехи.

На рис. 2.9 сплошными линиями изображены графики зависимости СВО на бит P_E как функции от коэффициента γ при $E_s / G_0 = 13,35$ дБ (что со-

ответствует вероятности ошибки $P_E = 10^{-5}$ в отсутствии помех), эквивалентное отношение сигнал-помеха $(q_{\text{экв}})^2 = K_S P_S / P_j$ выступает в качестве параметра.

Из графиков на рисунке 2.9 видно, что для каждого отношения сигнал-помеха существует оптимальное значение $\gamma = \gamma_{\text{opt}}$, при котором СВО на бит $P_E(\gamma_{\text{opt}})$ имеет максимальное значение. Полагая, что $E_s \gg G_0$ и решая уравнение $dP_E/d\gamma$ получим максимальную СВО на бит при двоичной ЧМ [94]:

$$P_{E\text{max}} \approx \begin{cases} \frac{P_j e^{-1}}{K_S P_S}; & \frac{P_j}{K_S P_S} \leq 1, \quad \gamma = \gamma_{\text{opt}} \\ \frac{1}{2} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{P_j}{K_S P_S} \right)^{-1} \right]; & \frac{P_j}{K_S P_S} > 1, \quad \gamma = 1 \end{cases}$$

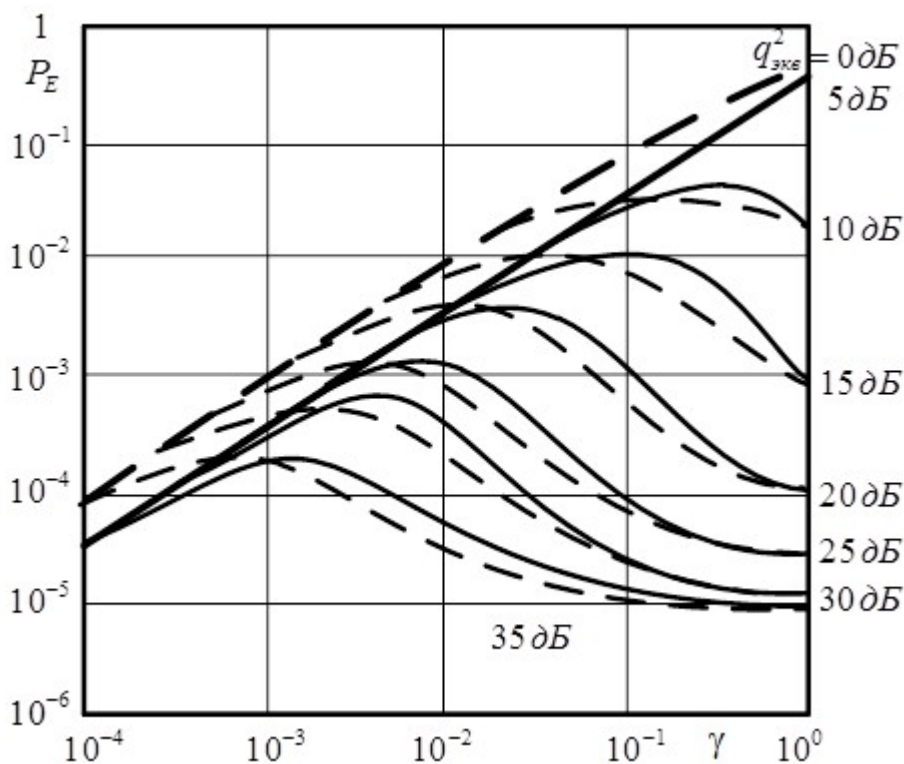


Рис. 2.9 – Зависимость СВО на бит P_E как функции от коэффициента γ при $E_s/G_0 = 13,35$ дБ

При $\gamma = \gamma_{\text{opt}}$ экспоненциальный характер зависимости СВО на бит P_E изменяется на линейный, что приводит к значительному уменьшению помехоустойчивости двоичной СРС с ППРЧ по сравнению с подавлением такой же СРС во всем диапазоне перестройки частоты.

На рис. 2.10 изображены графики СВО на бит P_E в зависимости от $q_{\text{экв}}^2$ и мощности собственных шумов приемника, представленных в данном случае отношением $E_s/G_0 = 13,35$ дБ, где $q_{\text{экв}}^2 = K_S P_S / P_j$:

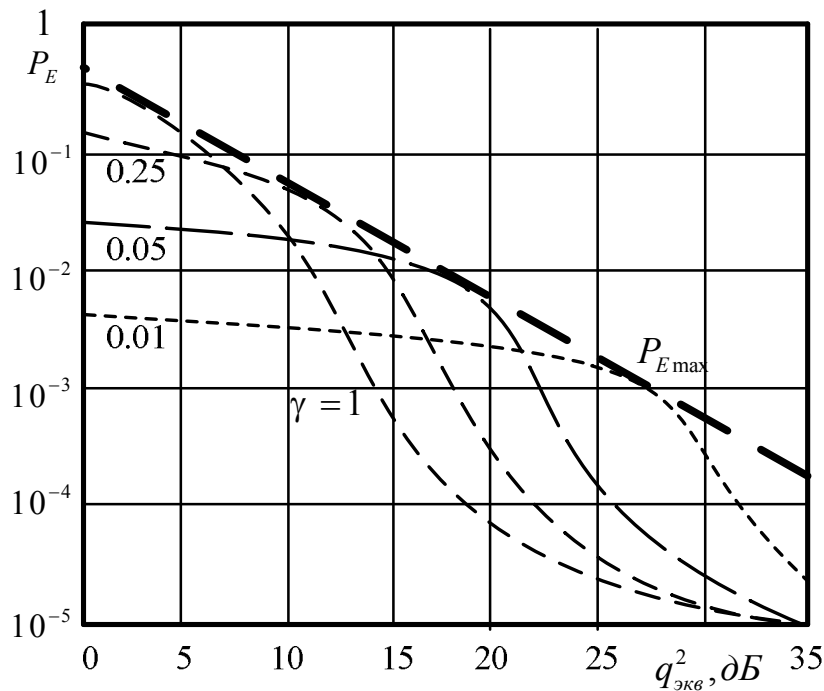


Рис. 2.10 – Зависимость СВО на бит P_E как функции от отношения $q^2_{\text{экв}}$

Из графиков на рисунке 2.10 видно, что СВО на бит при заданном отношении E_s/G_0 при увеличении отношения $q^2_{\text{экв}}$ стремится к $P_E = 10^{-5}$; учет шумов приемника, как и следовало ожидать, приводит к возрастанию СВО на бит. Огибающая графики (штриховая линия) отражает максимальную СВО на бит $P_{E \text{ max}}$ при $\gamma = \gamma_{\text{opt}}$.

В общем случае при M -ичной модуляции, $M = 2^k$ ($k = 1, 2, 3 \dots$), $\gamma = \gamma_{\text{opt}}$, максимальная СВО на бит $P_{E \text{ max}}$ СРС с ППРЧ в условиях воздействия наихудшей шумовой помехи в части полосы определяется из выражения [92, 95, 96]:

$$P_{E \text{ max}} \approx \begin{cases} \frac{\beta G_j}{E_s}; & \rho \leq \frac{E_s}{G_j}, \quad \gamma = \gamma_{\text{opt}} \\ \frac{M}{4} e^{-\frac{k E_s}{2 G_j}}; & \rho > \frac{E_s}{G_j}, \quad \gamma = 1 \end{cases}.$$

Здесь E_s/G_j отношение энергии сигнала на бит E_s к спектральной плотности мощности помехи G_j (без учета влияния собственных шумов приемника):

$$\frac{E_s}{G_j} = \frac{P_s}{P_j} \frac{W_s}{R_b} = \frac{K_s P_s}{P_j},$$

где R_b – скорость передачи двоичных символов ($R_b = 1/T_b$), $\gamma = \gamma_{\text{opt}} = \rho G_j/E_s$. Значения параметров $\beta(k) \leq 0,37$ и $\rho(k) \leq 3,01$ дБ для различных k приведены в табл. 2.2 по данным из источника [96].

Таблица 2.2 – Значения параметров β и ρ

k	M	β	ρ , дБ
1	2	$e^{-1} = 0,3679$	3,01
2	4	0,2329	0,76
3	8	0,1954	-0,33
4	16	0,1803	-0,59

Анализ значений, представленных в табл. 2.2, показывает, что при воздействии на M -ичную СРС с ППРЧ наихудших шумовых помех в части полосы максимальная СВО на бит уменьшается с ростом размера алфавита сигнала M , но все равно СВО на бит имеет линейную зависимость, а это значительно снижает помехоустойчивость СРС с ППРЧ.

При воздействии на СРС с ППРЧ и M -ичной модуляцией широкополосной шумовой помехи с равномерно распределенной мощностью во всей полосе частот $W_s(\gamma = 1)$ СВО на бит P_E может быть представлена в виде:

$$P_E = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{m=2}^M (-1)^m C_M^m \exp \left[-k \left(1 - \frac{1}{m} \right) \left(\frac{G_0}{E_s} + \frac{P_j}{K_s P_s} \right)^{-1} \right],$$

где: $C_M^m = \frac{M!}{m!(M-m)!}$ – сочетания m из M .

Эффективность воздействия такой широкополосной шумовой помехи на M -ичную СРС с ППРЧ значительно уступает эффективности наихудшей шумовой помехи в части полосы [88].

Если принять, что для наихудших полосовых и независимых многотональных помех имеет место оптимальное значение отношения сигнал-помеха α_{opt} , ограниченное пределами (0; 1), а в каждом сегменте M -ичного сигнала имеется одна гармоническая помеха ($n = 1$), частота которой совпадает с центральной частотой сегмента, то на основе [4, 74] максимальная СВО на бит:

$$P_{E_{max}} \approx \begin{cases} \frac{1}{2}; & \frac{E_s}{G_j} \leq \frac{M}{k}, \quad \alpha_{opt} = \frac{k E_s}{M G_j} \\ \frac{M}{2kE_s / G_j}; & \frac{E_s}{G_j} > \frac{M}{k}, \quad \alpha = 1 \end{cases}.$$

На рис. 2.11 изображены графики зависимости максимальной СВО на бит $P_{E_{max}}$ как функции отношения сигнал-помеха E_s/G_j при $k = 1$ и $k = 4$ в условиях наихудших полосовых многотональных помех при $n = 1$ (сплошные линии).

Анализ приведенных на рис. 2.11 графиков зависимости $P_{E_{max}}$ позволяет сделать следующие выводы:

– в случае воздействия на СРС с ППРЧ и M -ичной модуляцией наихудших многотональных помех имеет место линейная зависимость $P_{E_{max}}$ для всех значений $P_{E_{max}} < 1/2$, вместе с тем рабочие характеристики (РХ) системы радиосвязи ухудшаются с увеличением k в соответствии со значением M/k ;

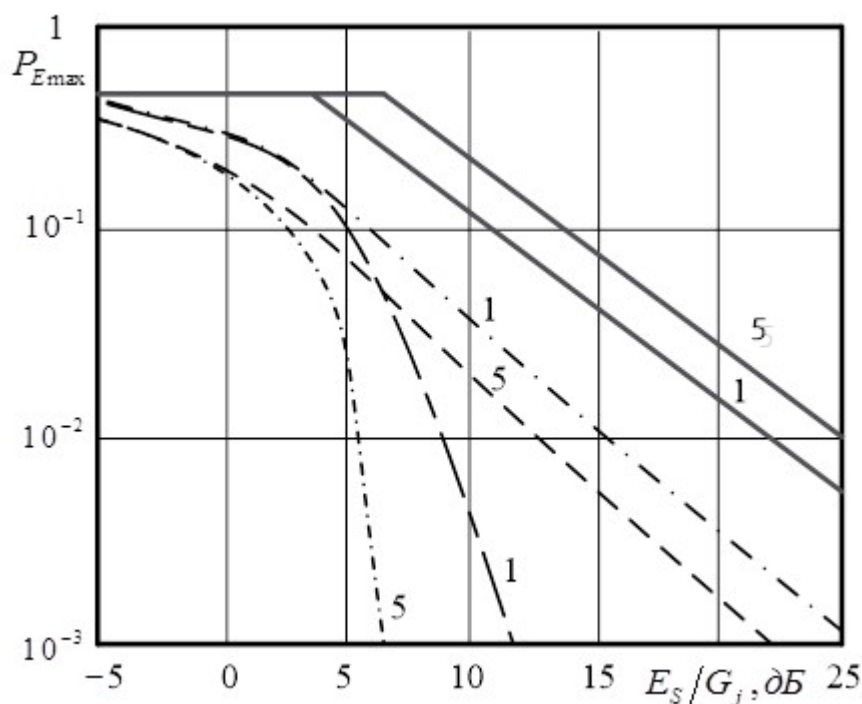


Рис. 2.11 – Зависимость максимальной СВО на бит от отношения сигнал-шум + помеха

– наихудшие многотональные помехи эффективнее наихудших шумовых помех в части полосы, так, при небольшом значении k ($k = 4, M = 16$) максимальная СВО на бит $P_{E\max}$ увеличивается примерно на порядок по сравнению с $P_{E\max}$ при действии наихудшей шумовой помехи и одном и том же отношении сигнал-помеха.

Таким образом, наихудшей помехой по показателю максимальной СВО $P_{E\max}$ в условиях, когда противнику неизвестен применяемый режим ППРЧ, является шумовая помеха в части полосы частот, при этом коэффициент, определяющий часть полосы сигнала с ППРЧ, занимаемой помехой γ должен соответствовать оптимальному значению γ_{opt} . В случае, если противнику известен применяемый режим ППРЧ, наихудшей помехой будет являться полигармоническая помеха.

Особенностью транспортной наземно-космической сети ОСССН, функционирующей по технологии АТМ, является построение виртуальных путей и каналов, подробно описанное в п. 1.1. Каждый ВРС будет занимать определенную полосу частот в каналах связи, как это показано на рис. 2.12.

Таким образом, воздействие средств РЭП на транспортную наземно-космическую сеть ОСССН будет приводить не только к подавлению физических КС, но и к понижению метрики виртуальных путей ВРС. В настоящее время известно несколько подходов к описанию подобного радиоэлектронного конфликта между СС и средствами РЭП. Так, в работах [97–99] была рассмотрена динамическая модель радиоэлектронного конфликта, соответствующая метасистеме «система связи – средство радиоэлектронного подавления».

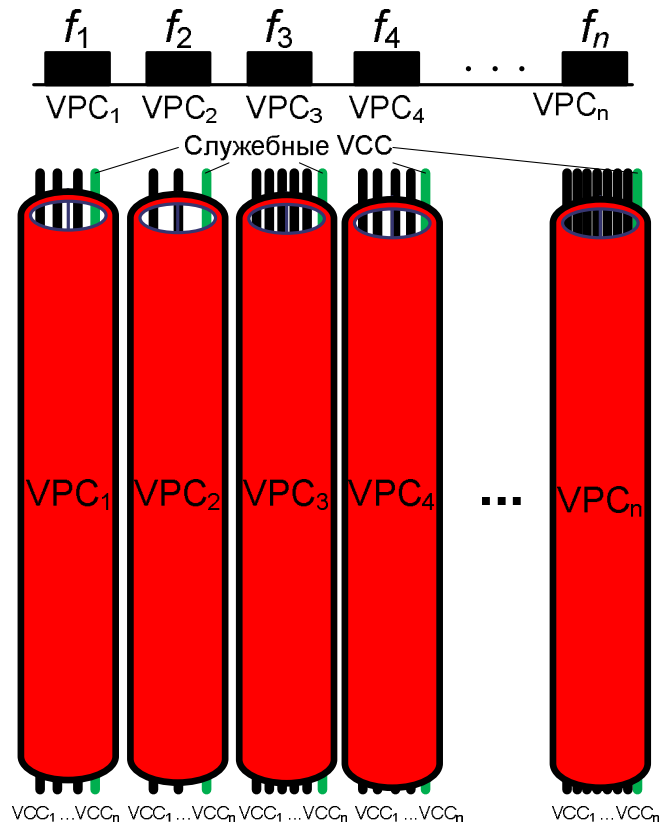


Рис. 2.12 – Распределение частотного диапазона КС между VPC

В работах [97, 98] показано, что отображением развития радиоэлектронного конфликта на параметры канала связи является периодическое изменение его пропускной способности. Для формализованного описания периодического изменения пропускной способности канала связи в работах [97, 98] предложено использовать зависимость показателя отношения сигнал к сумме шум и помеха, формализованную выражением:

$$q(t) = \left[\begin{array}{l} F_1(q_{\min}, F_s, P_j, \gamma, t_{\text{СКЗ}}, t_{\text{РП}}, t) \\ F_2(q_{\min}, F_s, L, w_{ji}, \varphi_{ji}, t_{\text{СКЗ}}, t_{\text{РП}}, t) \end{array} \right] \Big|_{P_E = P_{E \max}}, \quad (2.2)$$

где q_{\min} – значение ОСШП в КС, при котором невозможна передача информации; F_s – полоса частот СРС; P_j – мощность помехи; γ – коэффициент, характеризующий часть полосы частот VPC, занимаемую помехой $0 \leq \gamma \leq 1$; P_E – средняя вероятность ошибки на бит; L – число немодулированных гармонических колебаний; w_{ji} и φ_{ji} – частота и начальная фаза i -го гармонического колебания; $t_{\text{СКЗ}}$ – время, необходимое для смены сигнально кодовых созвездий; $t_{\text{РП}}$ – время реакции помех.

В работах [97–101] исследовались вопросы устойчивости СС в условиях динамического изменения сигнально-помеховой обстановки под воздействием преднамеренных помех. Однако вопросы реакции схем адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования в условиях изменяющейся сигнально-помеховой обстановки не исследовались. В ка-

честве объекта, на основе которого проводились исследования в соответствии с описанием транспортной наземно-космической сети ОССН, были выбраны каналы спутниковой связи НКСС на основе стандарта DVB-S2.

Оцениваемые параметры:

– оценка влияния параметров изменения сигнально-помеховой обстановки на битовую скорость канала связи со схемой адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования;

– оценка влияния параметров изменения сигнально-помеховой обстановки на режимы функционирования спутниковых каналов SCPC (Single Channel per Carrier – один канал на одну несущую), что соответствует наличию одного виртуального канала (VCC) в составе VPC, и MCPC (Multiple Channels per Carrier – несколько каналов на одну несущую), что соответствует наличию двух и более VCC в составе VPC;

– оценка влияния параметров изменения сигнально-помеховой обстановки на показатели метрики отдельного КС в составе сети для протоколов маршрутизации;

– оценка влияния сложности схемы адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования на изменение битовой пропускной способности и показатель метрики отдельного КС.

В качестве исходных данных использовались работы [102–106] и результаты математического моделирования спектральной эффективности каналов DVB-S2 [107].

Элементом новизны предложенной модели является дополнительная оценка параметров сетевого уровня в условиях допущения о квазигармоническом законе изменения пропускной способности каналов связи как результата преднамеренных помеховых воздействий. Также к элементу новизны стоит отнести учет схем адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования.

Особенностью реализации протокола DVB-S2 для каналов спутниковой связи является наличие режима ACM (Adaptive Coding and Modulation) для адаптивного выбора вида сигнала и скорости кодирования в зависимости от ОСШП на входе приемника. Это позволяет осуществлять гибкое регулирование параметров кодирования и модуляции передатчика в зависимости от значения ОСШП на входе приемника при заданном уровне достоверности приема. При этом параметры кодирования и модуляции могут изменяться от кадра к кадру. В стандарте DVB-S2 предусматриваются следующие скорости кодирования FEC (1/4, 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9 и 9/10) при емких видах модуляции (QPSK, 8-PSK, 16-APSK и 32-APSK). Для защиты от ошибок приема сигналов в стандарте DVB-S2 используется перемежение данных и наложение двухуровневого кода для прямой коррекции ошибок FEC. В качестве внутреннего кода используется код LDPC, в качестве внешнего – код БЧХ (код Боуза-Чоудхури-Хоквенгема). Таким образом, благодаря возможности адаптивного выбора вида модуляции и скоростей кодирования каналы могут работать в широком диапазоне значений ОСШП с показателем спек-

тральной эффективности, близким к теоретически достижимому. Так, канал связи DVB-S2 может работать при ОСШП от $-2,4$ дБ (модуляция QPSK, скорость кода $R = 1/4$) до 16 дБ (модуляция 32-APSK, скорость кода $R = 9/10$), причем для этого канала доступны показатели эффективности спектра от $0,5$ до $4,5$ (бит/с)/Гц. Схемы адаптивного выбора вида модуляции и скорости кодирования для DVB-S2 приведены в табл. 2.3 по данным, представленным в работах [102–107].

Таблица 2.3 – Параметры схемы адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования для канала DVB-S2 [102-107]

ОСШП в полосе частот канала [дБ]	Тип сигнала	Скорость Кодирования, R	Коэффициент эффективности спектра [(бит/с)/Гц]
-2,35	QPSK $I = 2$	1/4	0,49
-1,24		1/3	0,66
-0,3		2/5	0,79
1		1/2	1
2,23		3/5	1,19
3,1		2/3	1,32
4,03		3/4	1,49
4,68		4/5	1,59
5,18		5/6	1,65
6,2		8/9	1,77
6,42		9/10	1,79
5,5	8-PSK $I = 3$	3/5	1,78
6,62		2/3	1,98
7,91		3/4	2,23
9,35		5/6	2,48
10,69		8/9	2,65
10,98		9/10	2,68
8,97	16-APSK $I = 4$	2/3	2,64
10,21		3/4	2,97
11,03		4/5	3,17
11,61		5/6	3,3
12,89		8/9	3,52
13,13		9/10	3,57
12,73	32-APSK $I = 5$	3/4	3,7
13,64		4/5	3,95
14,28		5/6	4,12
15,69		8/9	4,4
16,05		9/10	4,45

На рис. 2.13 приведены результаты моделирования значений показателя эффективности спектра для заданной вероятности ошибки пакета 10^{-7} для каналов DVB-S2, представленные в работе [107].

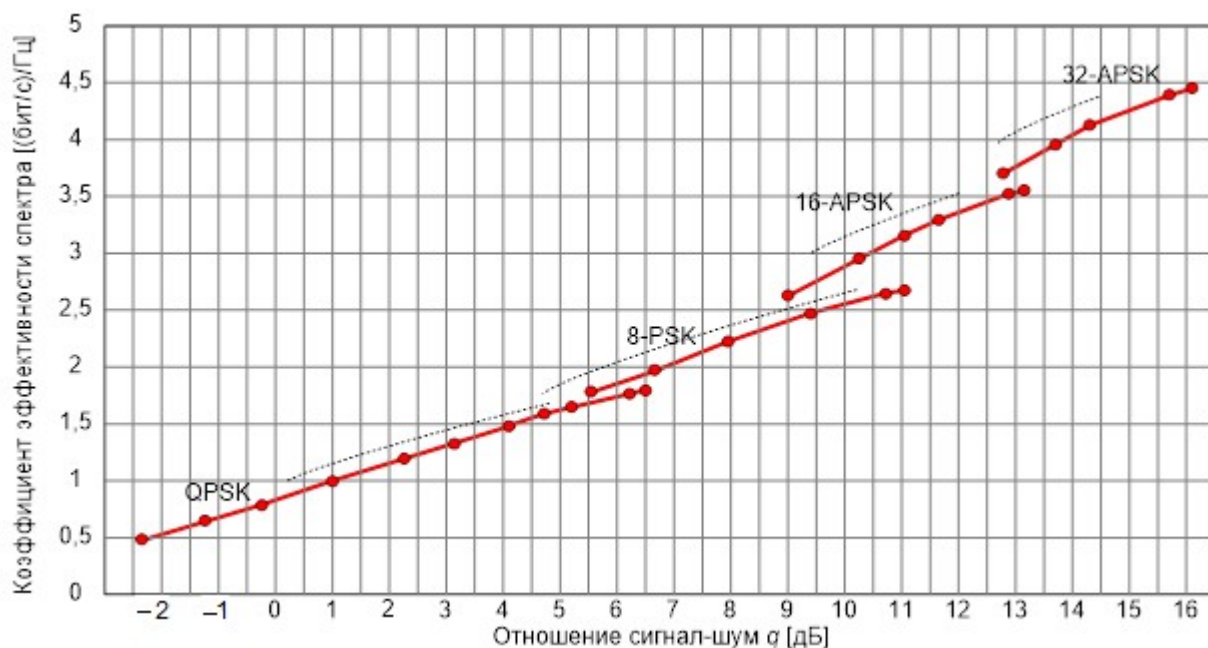


Рис. 2.13 – Результаты моделирования значений показателя коэффициента эффективности спектра для каналов DVB-S2

Эффективная битовая пропускная способность канала связи в полосе 1 Гц равна спектральной эффективности канала и зависит от складывающейся сигнально-помеховой обстановки. Таким образом, она определяется значением ОСШП $q(t)$, а также емкостью используемого сигнала $I(q)$ и скоростью кода $R(q)$:

$$C_{\text{Hz}}(q) = I(q) R(q). \quad (2.3)$$

В режиме работы SCPC вся скорость передачи в канале $V(q)$ используется для соединения «точка» – «точка» между двумя абонентами. Соответственно, битовая скорость передачи в канале с полосой F будет составлять:

$$V_{\text{SCPC}}(q) = F I(q) R(q). \quad (2.4)$$

В режиме MCPC, при временном разделении абонентов TDMA (Time Division Multiple Access), скорость передачи в канале будет снижаться пропорционально информационной нагрузке от абонентов. При этом возможно два варианта временного разделения абонентов:

- фиксированное разделение пропорционально количеству абонентов N или информационной нагрузке отдельных абонентов λ_n ;
- случайный множественный доступ абонентов.

При фиксированном разделении канала пропорционально интенсивности информационного трафика на N абонентов скорость передачи, доступная каждому абоненту, составит:

$$V_{\text{MCPC}}(q) = F I(q) R(q)/N. \quad (2.5)$$

Время задержки при передаче сообщения объемом D_{mes} [бит] по такому каналу составит:

$$T_{\text{зап}} = \frac{D_{\text{мес}}}{V_{\text{МСРС}}} + \frac{d_{\text{сот}}}{c}, \quad (2.6)$$

где: $d_{\text{сот}}$ – дальность спутникового канала в км (в работе используется допущение о том, что дальность равна высоте орбиты КАС, что при нахождении спутника у линии горизонта может привести к существенным погрешностям вычислений); $c = 300\,000$ км/с.

Фактически выражения (2.4–2.6) определяют зависимость параметров канального спутникового канала от параметров физического уровня при функционировании каналов в режимах SCPC и MCPC.

Рассмотрим показатели сетевого уровня. Метрика M , как основной показатель качества канала связи на сетевом уровне модели OSI, определяет количественную меру качественных характеристик канала связи – времени передачи, надежности и скорости. При вычислении пути в сетях протоколы маршрутизации используют критерий минимизации показателя метрики пути

$$\sum_i M_i \rightarrow \min.$$

Метрика i -го КС в протоколе PNNI вычисляется по формуле [76, 77, 87, 108–118]:

$$M_i = \frac{K}{V_i(q)} + T_{\text{зад } i}(q), \quad (2.7)$$

где: $V_i(q)$ – скорость передачи в канале связи, определяемая в соответствии с выражениями (2.4) и (2.5), [бит/с]; $T_{\text{зад}}$ – задержка передачи в канале связи, определяемая в соответствии с выражениями (2.6) [с]; $K = 10^8$ [бит].

Эффектом от воздействия средств РЭП на КС на сетевом уровне будет являться увеличение значения метрики КС. В случае полного подавления КС ($M_i = \infty$) данных приостанавливается, и маршрутизатор осуществляет пересчет путей передачи в сети. Вместе с тем, в случае, если суммарная метрика КС в составе VPC превысит максимально допустимое значение ($M_{VPC_j} > M_{VPC_j}^{QoS}$) и не будет обеспечиваться передача пакета за заданное время, также будет осуществляться поиск нового пути передачи трафика. Таким образом, потоки отказов в отдельных КС и VPC будут в сумме составлять поток отказов соединения ATM, как это показано на рис. 2.14.

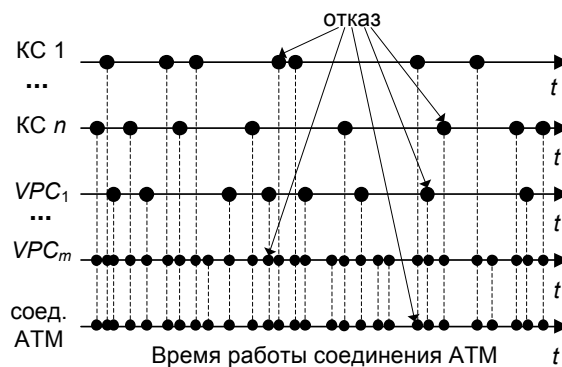


Рис. 2.14 – Поток отказов в соединении ATM

Временным параметром, характеризующим поток отказов в соединении АТМ является среднее время между отказами соединения АТМ, при этом наибольшее влияние на его величину оказывают значения среднего времени между отказами отдельных КС, так как воздействие средств РЭП ориентировано, в первую очередь, на полное подавление КС.

Схема взаимосвязи исследуемых канальных и сетевых параметров для спутниковых каналов DVB-S2 приведена на рис. 2.15.

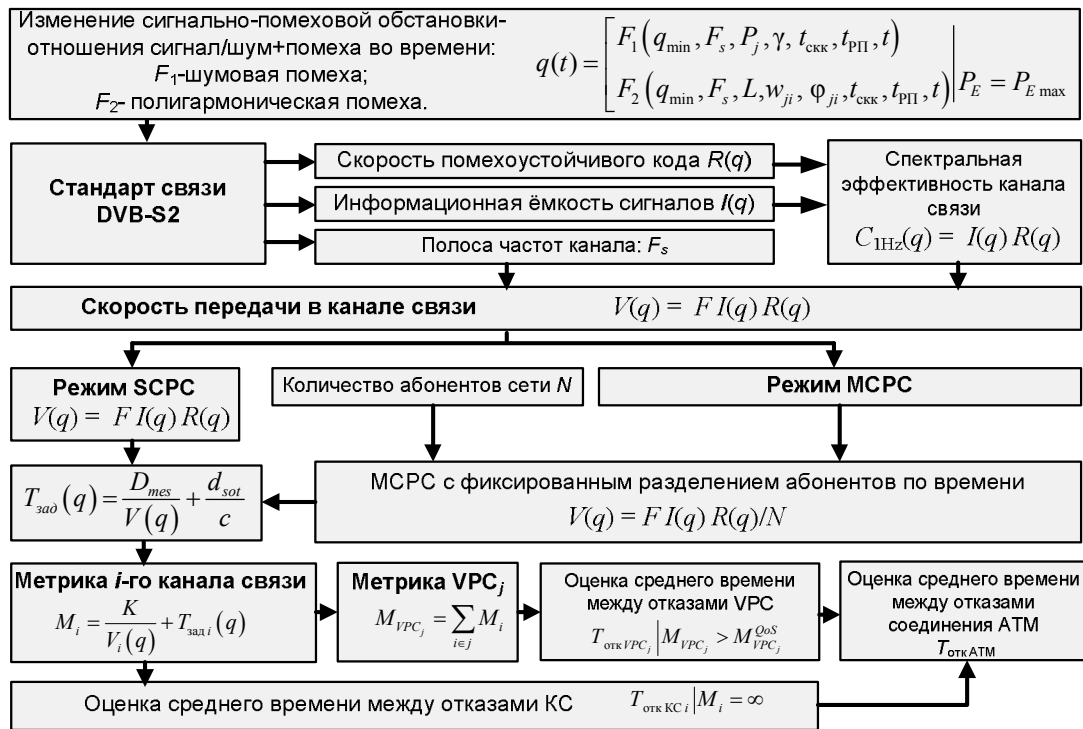


Рис. 2.15 – Схема взаимосвязи исследуемых канальных и сетевых параметров для спутниковых каналов DVB-S2

Разработанная модель позволяет количественно оценить эффекты от воздействия средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС. Кроме того, оценка характера потока отказов соединения АТМ, сделанная на основе разработанной модели, позволяет рассмотреть процесс функционирования межузлового соединения транспортной наземно-космической сети ОСССН ВС РФ при воздействии средств РЭП в целом.

Исследование влияния изменения сигнално-помеховой обстановки на характеристики канального и сетевого уровней представлено в п. 3.1.

2.3 Модель функционирования межузлового соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП

Рассмотрим межузловое соединение между абонентами в технологии АТМ, процесс функционирования которого определяется помехоустойчивостью КС. В случае отказа КС вследствие воздействия средств РЭП соединение НКСС проходит через следующую последовательность смены

состояний: работоспособен – отказ КС – ожидание восстановления связи – изменение (реконфигурация/коррекция) собственных параметров в интересах восстановления работоспособности – работоспособен.

Введем следующие обозначения для формализации процесса функционирования соединения НКСС (при допущении о пуассоновском характере процесса отказов/восстановления КС):

S_0, S_1, S_2, S_3 – состояния, в которых находится соединение НКСС;

$\lambda_{\text{отк КС}}$ – интенсивность отказов КС соединения НКСС;

$\mu_{\text{вост КС}}$ – интенсивность восстановления КС соединения НКСС;

$T_{\text{отк КС}} = 1/\lambda_{\text{отк КС}}$, – среднее время между отказами КС соединения НКСС;

$T_{\text{вост КС}} = 1/\mu_{\text{вост КС}}$ – среднее время восстановления КС соединения НКСС;

K_{Γ} – коэффициент готовности ИНС;

$T_{\text{диагн}}$ – время диагностики отказа ИНС;

$T_{\text{ож}}$ – время ожидания восстановления связи;

$T_{\text{рек}}$ – время реконфигурации путей в ИНС.

Формализуем рассматриваемый процесс функционирования соединения НКСС в виде марковского процесса смены состояний (рис. 2.16).

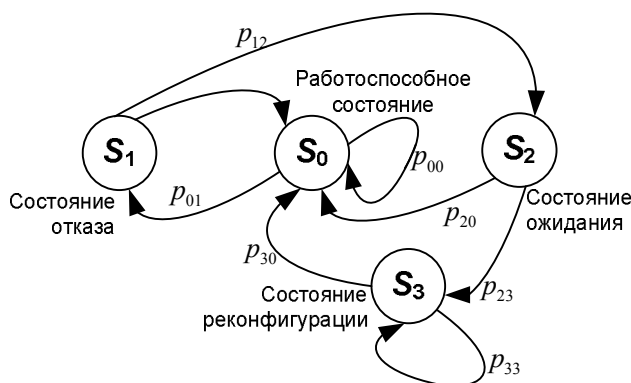


Рис. 2.16 – Формализованный Марковский процесс функционирования соединения НКСС в условиях отказов КС

В представленной модели процесс функционирования соединения НКСС представлен в виде последовательности перехода между различными состояниями:

S_0 – «работоспособное состояние» соединения НКСС;

S_1 – «состояние отказа» КС, когда соединение НКСС отказ не диагностировало и продолжает использовать канал связи как работоспособный;

S_2 – «состояние ожидания», когда соединение НКСС диагностировало отказ КС, но ожидает восстановления связи в нем;

S_3 – «состояние реконфигурации», когда НКСС диагностировало, что восстановления связи в канале не произошло, и запущен процесс изменения собственных параметров в интересах восстановления работоспособности.

В начальный момент времени соединение НКСС находится в «работоспособном состоянии». В случае отказа КС оно переходит в состояние «состояние отказа» $S_0 \rightarrow S_1$. Если за период диагностики $T_{\text{диагн}}$ КС успел отка-

зять и восстановиться ($T_{\text{диагн}} > T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}$), то система возвращается в «работоспособное состояние» $S_1 \rightarrow S_0$. Если за время $T_{\text{диагн}}$ канал не успел восстановиться ($T_{\text{диагн}} < T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}$), то соединение НКСС диагностирует отказ канала и переходит $S_1 \rightarrow S_2$ в «состояние ожидания». Если за время ожидания канал восстановится ($T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} > T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}$), то соединение НКСС переходит $S_2 \rightarrow S_0$ в «работоспособное состояние», в противном случае ($T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} < T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}$) оно переходит $S_2 \rightarrow S_3$ в «состояние реконфигурации», после чего восстанавливает свое «работоспособное состояние» $S_3 \rightarrow S_0$.

Параметры переходов $S_i \rightarrow S_j$ определяются вероятностями p_{ij} зависящих от вероятности отказа $P_{\text{отк}}(t)$ и вероятности восстановления $P_{\text{вост}}(t)$ каналов связи за время t , а также от временных параметров соединения НКСС: времени диагностики отказа канала $T_{\text{диагн}}$, времени ожидания восстановления связи $T_{\text{ож}}$, времени изменения (реконфигурация/коррекция) собственных параметров в интересах восстановления работоспособности $T_{\text{рек}}$.

Для временных параметров: $T_{\text{отк КС}} = 1/\lambda_{\text{отк КС}}$, $T_{\text{вост КС}} = 1/\mu_{\text{вост КС}}$, $T_{\text{диагн}}$, $T_{\text{ож}}$, $T_{\text{рек}}$ – введем допущение о пуассоновском потоке процессов отказа и восстановления и, соответственно, экспоненциальном распределении времени $T_{\text{отк КС}}$ и $T_{\text{вост КС}}$, как это показано на рис. 2.17. Данное допущение обосновано в п.3.1.

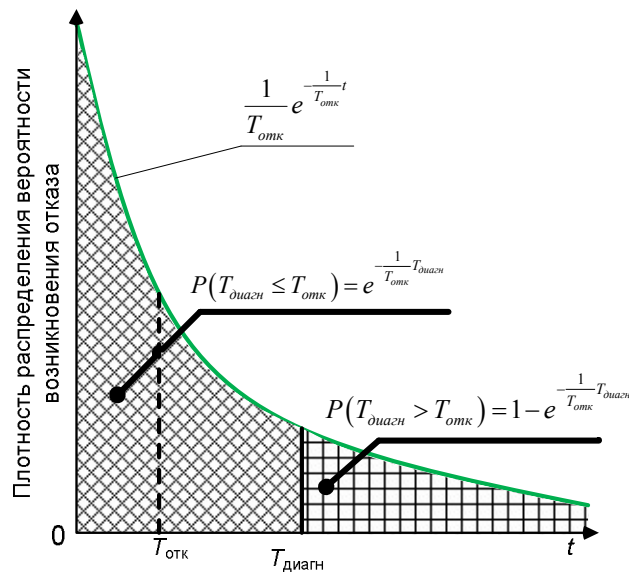


Рис. 2.17 – Пояснение к допущению о пуассоновском потоке процессов отказа и восстановления

Вероятность p_{00} того, что интервал диагностики $T_{\text{диагн}}$ меньше времени среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, то есть КС за время диагностики не отказал и продолжает работать:

$$p_{00} = P(T_{\text{диагн}} < T_{\text{отк КС}}) = e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}}. \quad (2.8)$$

Вероятность p_{01} того, что интервал диагностики $T_{\text{диагн}}$ больше времени среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, то есть канал связи за время ди-

агностики $T_{\text{диагн}}$ отказал и во время проведения диагностики объект установил этот отказ – система перешла в «состояние отказа»:

$$p_{01} = P(T_{\text{диагн}} > T_{\text{отк КС}}) = 1 - e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}}. \quad (2.9)$$

Вероятность p_{10} того, что за интервал диагностики $T_{\text{диагн}}$ канал успел и отказать, и восстановиться, в результате система вновь перешла в «работоспособное состояние»:

$$p_{10} = P(T_{\text{диагн}} > T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) = 1 - e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}. \quad (2.10)$$

Вероятность p_{12} того, что за интервал диагностики $T_{\text{диагн}}$ канал успел отказать, но не успел восстановиться и система перешла в «состояние ожидания» восстановления связи:

$$p_{12} = P(T_{\text{диагн}} < T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) = e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}. \quad (2.11)$$

Вероятность p_{20} того, что за время интервала диагностики $T_{\text{диагн}}$ и время ожидания $T_{\text{ож}}$ канал успел и отказать, и восстановиться, в результате система вернулась в «работоспособное состояние»:

$$p_{20} = P(T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} > T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) = 1 - e^{-\frac{T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}. \quad (2.12)$$

Вероятность p_{23} того, что за время интервала диагностики $T_{\text{диагн}}$ и время ожидания $T_{\text{ож}}$ канал успел отказать, но не успел восстановиться, и система перешла в «состояние реконфигурации»:

$$p_{23} = P(T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}} < T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) = e^{-\frac{T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}. \quad (2.13)$$

Время реконфигурации принято распределенным по экспоненциальному закону с математическим ожиданием $T_{\text{рек}}$. В этом случае вероятность p_{33} того, что за время $T_{\text{рек}}$ объект успел изменить свои параметры и система перешла в «работоспособное состояние»:

$$p_{30} = P(t > T_{\text{рек}}) = e^{-1}, \quad (2.14)$$

а вероятность того, что за тоже время $T_{\text{рек}}$ продолжается реконфигурация:

$$p_{33} = P(t < T_{\text{рек}}) = 1 - e^{-1}. \quad (2.15)$$

Формализация функционирования соединения НКСС в виде марковского процесса с данными переходными вероятностями p_{ij} позволяет составить уравнения для состояний системы, при допущении о стационарности процесса ее функционирования:

$$\begin{cases} P(S_1)p_{10} + P(S_2)p_{20} + P(S_3)p_{30} - P(S_0)p_{01} - P(S_0)p_{00} + P(S_0)p_{00} = 0; \\ P(S_0)p_{01} - P(S_1)p_{12} - P(S_1)p_{10} = 0; \\ P(S_1)p_{12} - P(S_2)p_{20} - P(S_2)p_{23} = 0; \\ P(S_2)p_{23} - P(S_3)p_{30} - P(S_3)p_{33} + P(S_3)p_{33} = 0; \\ P(S_0) + P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) = 1. \end{cases}$$

Решение данной системы уравнений позволит получить вероятности нахождения системы в соответствующих состояниях, в зависимости от переходных вероятностей:

$$\begin{cases} P(S_0) = \frac{P_{30}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}}; \\ P(S_1) = \frac{P_{01}P_{30}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}}; \\ P(S_2) = \frac{P_{01}P_{12}P_{30}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}}; \\ P(S_3) = \frac{P_{01}P_{12}P_{23}}{P_{01}P_{30} + P_{01}P_{12}P_{30} + P_{30} + P_{01}P_{12}P_{23}}; \\ P(S_0) + P(S_1) + P(S_2) + P(S_3) = 1. \end{cases} \quad (2.16)$$

Проведем исследование изменения переходных вероятностей p_{ij} в системе в следующих типовых ситуациях.

1. Период диагностики отказа $T_{\text{диагн}}$ намного меньше среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$ и времени восстановления КС $T_{\text{вост КС}}$, например $T_{\text{диагн}} = 0,01$; $T_{\text{отк КС}} = 1$; $T_{\text{вост КС}} = 0,25$, в этом случае вероятность того, что за время $T_{\text{диагн}}$ канал откажет, очень низка, что обуславливает значение $p_{00} \rightarrow 1$ и соответственно значение $P(S_0) \rightarrow 1$. Однако если же отказ КС наступает, то происходит своевременная его диагностика и система из работоспособного состояния S_0 переходит в состояние отказа S_1 , из которого без потерь времени на ожидание восстановления связи переходит в состояние реконфигурации системы S_3 с последующим возвращением в работоспособное состояние S_0 (рис. 2.18, а).

2. Период диагностики отказа $T_{\text{диагн}}$ сопоставим со средним временем между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, его временем восстановления $T_{\text{вост КС}}$, а также со временем ожидания восстановления связи $T_{\text{ож}} T_{\text{диагн}} \approx (1/\lambda_{\text{отк КС}}) + (1/\mu_{\text{вост КС}}) \approx T_{\text{ож}}$, например (рис. 2.19, б): $T_{\text{диагн}} = 0,8$; $T_{\text{ож}} = 1,25$; $T_{\text{отк КС}} = 1$; $T_{\text{вост КС}} = 0,25$. В этом случае при отказе канала связи происходит своевременная его диагностика, и система из работоспособного состояния S_0 переходит в состояние отказа S_1 . Из состояния отказа S_1 после ожидания восстановления связи в течении $T_{\text{ож}}$ система переходит в состояние реконфигурации S_3 с последующим возвращением в работоспособное состояние S_0 (в случае если система не успела восстановиться за время ожидания $T_{\text{ож}}$). В случае, если на время ожидания $T_{\text{ож}}$ канал связи успел восстановиться, система сразу же переходит в состояние S_0 .

3. Период диагностики отказа $T_{\text{диагн}}$ намного больше среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$ и времени восстановления канала связи $T_{\text{вост КС}}$, например: $T_{\text{диагн}} = 5$, $T_{\text{ож}} = 5$, $T_{\text{отк КС}} = 1$, $T_{\text{вост КС}} = 0,25$. В этом случае при отказе КС не происходит своевременная его диагностика и система из работоспособного состояния S_0 переходит в состояние отказа S_1 , из которого не может перейти в состояние реконфигурации S_3 (через состояние S_2), а следовательно, и в работоспособное состояние S_0 , ожидая пока истечет очередной период диагностики. При этом существенно повышается вероятность p_{10} , что система за время $T_{\text{диагн}}$ успеет самостоятельно восстановиться. Фактически такое состояние соответствует «необнаруженному отказу», так как при наступлении отказа до истечения времени очередного периода диагностики $T_{\text{диагн}}$ система находится как бы в работоспособном состоянии и продолжает использовать отказавший канал (рис. 2.18, в).

Переходные вероятности p_{ij} и конечные вероятности $P(S_i)$ нахождения в состояниях S_i для вышерассмотренных типовых ситуаций и при указанных ограничениях приведены на рис. 2.18.

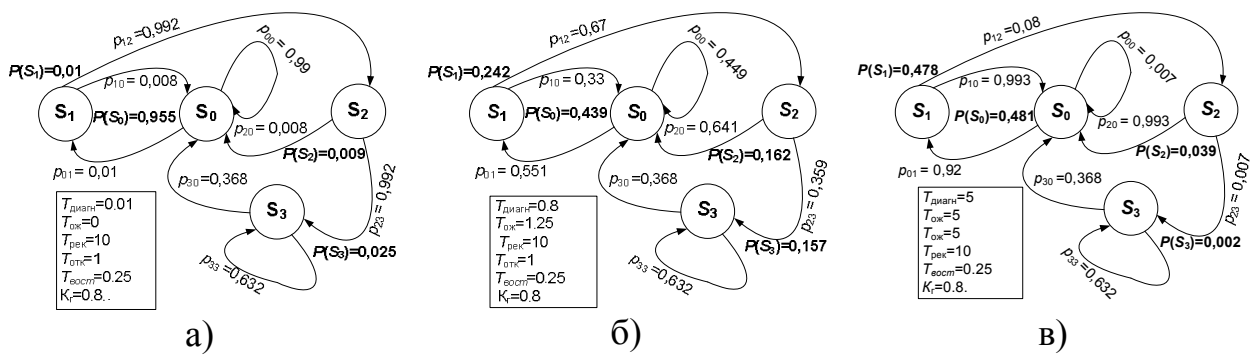


Рис. 2.18 – Значения переходных вероятностей

Для решения задачи обоснования временных параметров функционирования соединения НКСС из (2.16), с учетом (2.9–2.15), сокращая и приводя подобные, получим выражение для обеспечения заданного уровня вероятности $P(S_0)$, который по своему физическому смыслу является коэффициентом готовности ИНС K_{Γ} :

$$K_{\Gamma} = P(S_0) = \frac{e^{-1}}{\left(1 - e^{-\frac{1}{T_{\text{отк КС}} T_{\text{диагн}}}\right) \left(1 + e^{-\frac{1}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} T_{\text{диагн}}}\right) + \left(1 - e^{-\frac{1}{T_{\text{отк КС}} T_{\text{диагн}}}\right)^{-1} + e^{-\frac{1 - 2T_{\text{диагн}} + T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}}\right)}. \quad (2.17)$$

Отличительной особенностью предлагаемой модели, по сравнению с аналогами, является ее универсальность применения для моделирования объектов связи, функционирование которых зависит от связанного с ними КС. Кроме того, в рамках предложенной модели впервые строго увязаны значения временных интервалов диагностики ($T_{\text{диагн}}$) и ожидания восстановления связи ($T_{\text{ож}}$) со средним временем между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, а следовательно на основе данной модели возможна разработка элементов НМА повышения

коэффициентом готовности ИНС K_{Γ} путем адаптивного изменения этих интервалов в зависимости от текущего значения $T_{\text{отк КС}}$.

Исследование поведения конечных вероятностей состояний системы $P(S_i)$, определяемых в соответствии с выражениями (2.16), представлено в п. 3.2.

2.4 Алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП

Разработанный алгоритм основывается на описанной модели функционирования межузлового соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП. Анализ поведения конечных вероятностей состояний системы $P(S_i)$, проведенный в п. 3.2, показывает, что увеличение отношения $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}} > 5$ не приводит к повышению коэффициента готовности ИНС K_{Γ} (рис. 3.12). Таким образом, целесообразно в разработанном алгоритме определить $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}} = 5$, что подтверждается использованием аналогичного отношения в протоколе PNNI [76] и близкого к нему значения в других распространенных протоколах маршрутизации. Так, для протокола OSPF отношение $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}} = 4$, а для протокола EIGRP $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}} = 3$ [108]. Кроме того, анализ значений параметров качества обслуживания в сетях АТМ при передаче трафика уровня адаптации AAL5 (п. 1.1, табл. 1.1–1.2) позволяет задать нижний порог для значения времени диагностики $T_{\text{диагн}}$. Задержка в передаче информационного пакета в сетях АТМ для уровня адаптации AAL5 составляет 50 мс (табл. 1.2). В случае если временной интервал диагностики $T_{\text{диагн}}$ не превысит этого значения, система сигнализации не сможет адекватно констатировать отказ КС ввиду того, что служебные пакеты будут отправляться коммутатором АТМ с периодом меньшим, нежели возможная разница в задержке между приходами этих пакетов на соседний коммутатор.

Алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП представлен на рис. 2.19. Входными параметрами алгоритма являются:

- заданный уровень вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}^{\text{зад}}$;
- среднее время между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$;
- значение вероятности связности соединения ИНС $P_{\text{св}}$;
- среднее время восстановления КС $T_{\text{вост КС}}$;
- определенное протоколом PNNI время диагностики $T_{\text{диагн PNNI}}$;
- заданная точность вычислений ϵ .

Заданный уровень вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}^{\text{зад}}$ определяется требованиями по устойчивости связи, предъявляемыми к транспортной наземно-космической сети ОСССН. Значение вероятности связности соединения ИНС $P_{\text{св}}$ заблаговременно определяется исходя из структуры СС и значений вероятности работоспособного состояния элементов ИНС (см. п. 1.4). Процесс определения значения среднего времени между отказами

КС $T_{отк КС}$ путем использования системы мониторинга сигнально-помеховой обстановки и механизмов сигнализации протокола PNNI описан в п. 4.1.

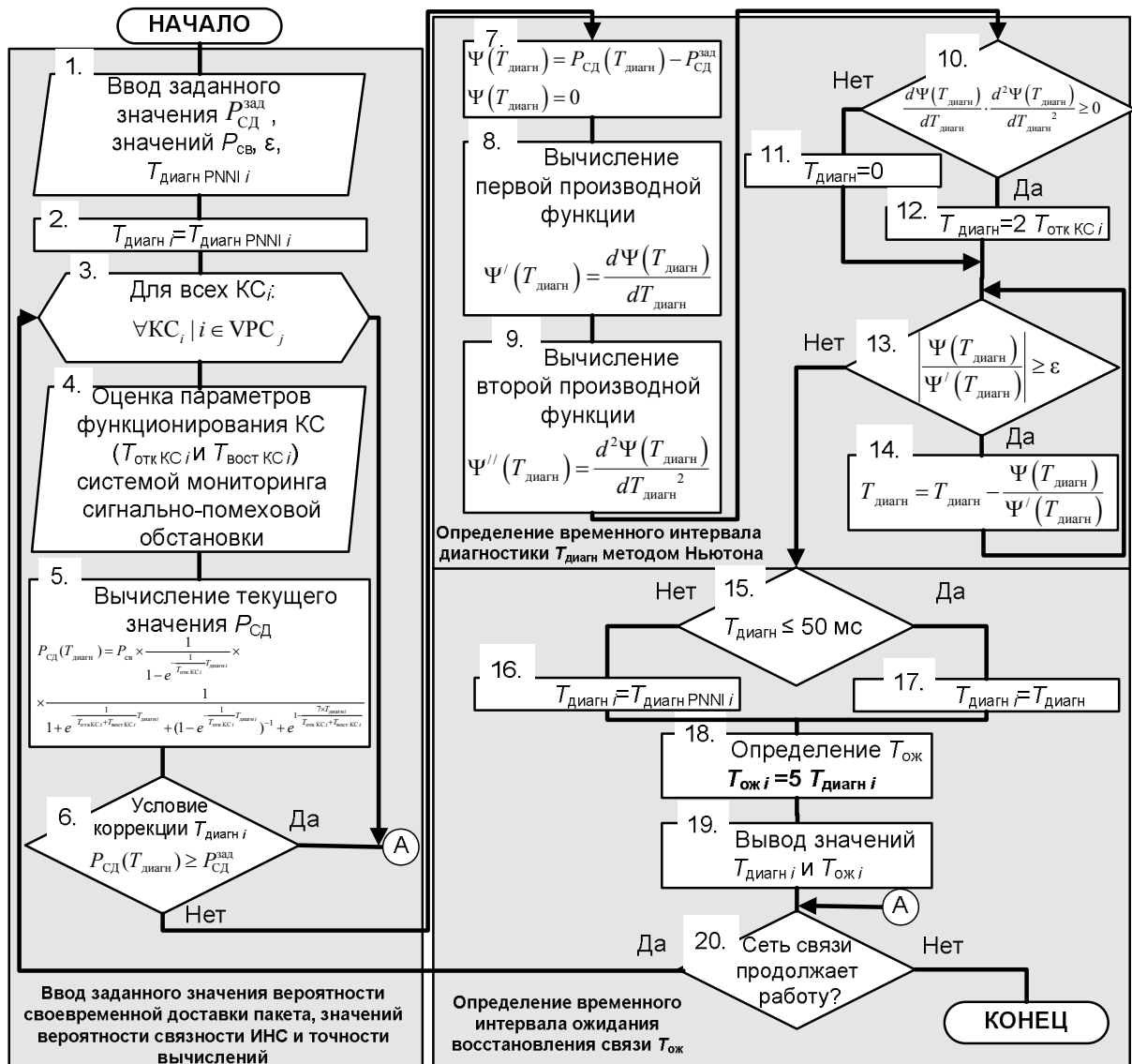


Рис. 2.19 – Алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межзвонном соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП

В ходе работы алгоритма осуществляется расчет текущего значения вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ (рис. 2.20), при этом $T_{ож} = 5T_{диагн}$ (блок 5). В случае если $P_{сд} \geq P_{сд}^{зад}$, алгоритм заканчивает работу. С учетом отношения между значениями временных интервалов сигнализации $T_{ож} = 5T_{диагн}$ и выражением (2.17) выражение (1.2) для определения вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$, принимает вид:

$$P_{сд}(T_{диагн i}) = \frac{P_{св}}{\left(1 - e^{-\frac{1}{T_{отк КС} T_{диагн i}}}\right) \left(1 + e^{-\frac{1}{T_{отк КС} + T_{вост КС} T_{диагн i}}} + (1 - e^{-\frac{1}{T_{отк КС} T_{диагн i}}})^{-1} + e^{-\frac{7 \times T_{диагн i}}{T_{отк КС} + T_{вост КС}}}\right)}. \quad (2.18)$$

Для вычисления значения времени диагностики $T_{\text{диагн}}$, необходимого для обеспечения заданного уровня вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}^{\text{зад}}$ при определенном значении вероятности связности соединения ИНС $P_{\text{св}}$ в блоке 7 вводится функция $\Psi(T_{\text{диагн}})$, описанная выражением (2.19).

$$\Psi(T_{\text{диагн}}) = \frac{P_{\text{св}}}{\left(1 - e^{-\frac{1}{T_{\text{отк КС}}} T_{\text{диагн}}}\right) \left(1 + e^{-\frac{1}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} T_{\text{диагн}}} + \left(1 - e^{-\frac{1}{T_{\text{отк КС}}} T_{\text{диагн}}}\right)^{-1} + e^{-\frac{1 - 7 \times T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}\right)} - P_{\text{СД}}^{\text{зад}} \quad (2.19)$$

Определение значения времени диагностики $T_{\text{диагн}}$ методом Ньютона производится в блоках 8–14. Для определения направления приближения вычислений $T_{\text{диагн}}$ находятся первая (блок 8) и вторая (блок 9) производные функции $\Psi(T_{\text{диагн}})$.

Первая производная функция (2.19) определяется выражением:

$$\frac{d\Psi(T_{\text{диагн}})}{dT_{\text{диагн}}} = -P_{\text{св}} \frac{\left[\left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк КС}} - T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}}} \right) \left(e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} (T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) + T_{\text{отк КС}} \cdot e^{\left(e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right)} \right) \right]}{\left((T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) T_{\text{вост КС}} \left(e^{\left(e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк КС}} - T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{-1} \right)} - 1 \right) \right)^2} + \frac{e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} (T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) + T_{\text{отк КС}} \cdot e^{-\frac{7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} \left(e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right)}}{\left((T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) T_{\text{вост КС}} \left(e^{\left(e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк КС}} - T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{-1} \right)} - 1 \right) \right)^2}$$

Вторая производная функции (2.19) определяется выражением:

$$\frac{d^2\Psi(T_{\text{диагн}})}{dT_{\text{диагн}}^2} = P_{\text{св}} \frac{\left[\frac{5T_{\text{диагн}}T_{\text{отк КС}} - T_{\text{отк КС}}^2 + 3T_{\text{диагн}}T_{\text{отк КС}} + T_{\text{диагн}}T_{\text{вост КС}} - T_{\text{отк КС}}T_{\text{вост КС}}}{(T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}})T_{\text{вост КС}}} \right]}{\left((T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) T_{\text{вост КС}} \left(e^{\left(e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк КС}} - T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{-1} \right)} - 1 \right) \right)^2} + \frac{\left(2e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк КС}} - T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} \right) \left(2T_{\text{отк КС}} e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - eT_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} \right)}{\left((T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) T_{\text{вост КС}} \left(e^{\left(e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк КС}} - T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{-1} \right)} - 1 \right) \right)^2} + \frac{e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}}{\left((T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) T_{\text{вост КС}} \left(e^{\left(e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк КС}} - T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{-1} \right)} - 1 \right) \right)^2} + \frac{T_{\text{вост КС}}^2}{\left((T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}) T_{\text{вост КС}} \left(e^{\left(e^{-\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}} - T_{\text{отк КС}} - T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}}} + e^{-1} \right)} - 1 \right) \right)^2}$$

$$\begin{aligned}
& e^{\frac{1-T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}} \left(2T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} \right) \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}}-T_{\text{отк КС}}-T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} \right) \\
& + \frac{\left(T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} \right) T_{\text{вост КС}}^2 \left(e \left(e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-2T_{\text{диагн}}-T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}}-T_{\text{отк КС}}-T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{-1} \right) - 1 \right)^2 +}{2e^{\frac{3T_{\text{диагн}}+T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} \left(e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right)} \\
& + \frac{\left(T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} \right)^2 \left(e \left(e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}}-T_{\text{отк КС}}-T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{-1} \right) - 1 \right)^2}{-} \\
& - 2P_{\text{св}} \left[e^{\frac{1-T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}} \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}}-T_{\text{отк КС}}-T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{-1} \right) \left(T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} \right) + \right. \\
& \left. + e \left(2e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}}-T_{\text{отк КС}}-T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{-1} \right) \left(e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) T_{\text{отк КС}} \right] \times \\
& \times \frac{\left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}}-T_{\text{отк КС}}-T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} \right) \left(2T_{\text{отк КС}} e^{\frac{1-T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}} - e T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} e^{\frac{1-T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}} \right)}{\left(T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} \right)^2 T_{\text{вост КС}}^2 \left(e \left(e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-7T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}}-T_{\text{отк КС}}-T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{-1} \right) - 1 \right)^3} + \\
& + \frac{e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}}} \left(T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} \right) + T_{\text{отк КС}} e^{\frac{-T_{\text{ож}}+2T_{\text{диагн}}+T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} \left(e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right)}{\left(T_{\text{отк КС}} + T_{\text{вост КС}} \right)^2 T_{\text{вост КС}}^2 \left(e \left(e^{\frac{T_{\text{диагн}}}{T_{\text{отк КС}}} - 1} \right) \left(e^{\frac{-2T_{\text{диагн}}-T_{\text{ож}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{\frac{-T_{\text{диагн}}-T_{\text{отк КС}}-T_{\text{вост КС}}}{T_{\text{отк КС}}+T_{\text{вост КС}}}} + e^{-1} \right) - 1 \right)^3}
\end{aligned}$$

В блоке 10 осуществляется определение направления приближения вычислений $T_{\text{диагн}}$. В случае, если произведение первой и второй производных отрицательно, поиск осуществляется слева и первоначально задается $T_{\text{диагн}} = 0$, как минимально возможное значение времени диагностики. В противном случае задается $T_{\text{диагн}} = 2T_{\text{отк КС}}$, как максимально возможное значение времени диагностики, обоснованное в п. 3.2 (рис. 3.9).

В блоках 13–14 производится итерационное вычисление значения $T_{\text{диагн}}$ с требуемой точностью ε . При достижении условия:

$$\left| \frac{\Psi(T_{\text{диагн}})}{dK_{\Gamma}(T_{\text{диагн}})} \right| \geq \varepsilon,$$

в блоке 19 осуществляется вывод значения времени диагностики $T_{\text{диагн}}$, необходимого для обеспечения заданного уровня вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}^{\text{зад}}$ при определенном значении вероятности связности соединения ИНС $P_{\text{св}}$.

В случае, если значение времени диагностики $T_{\text{диагн}}$ не превысит 50 мс (блок 15), делается вывод о невозможности обеспечения заданного уровня вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}^{\text{зад}}$ при исходных условиях (блок 16).

Определение значения времени ожидания восстановления связи $T_{ож} = 5T_{диагн}$ производится в блоке 17. При продолжении работы СС (блок 20) осуществляется переход в блок 3 для расчета значения времени диагностики $T_{диагн}$ для других КС маршрутизатора. В противном случае работа алгоритма заканчивается.

Таким образом, в результате работы алгоритма определяются значения времени диагностики $T_{диагн}$ и времени ожидания восстановления связи $T_{ож}$, при которых обеспечивается заданный уровень вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}^{зад}$ в условиях воздействия средств РЭП, характеризующегося значениями среднего времени между отказами КС $T_{отк\ КС}$.

Оценка эффективности разработанного алгоритма представлено в п. 3.2

2.5 Алгоритм маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности НКСС

Целью разработки алгоритма является сокращение времени реконфигурации $T_{рек}$. В работе [119] показано, что для резервируемых КС время реконфигурации $T_{рек}$ определяется в соответствии с выражением (2.20):

$$T_{рек} = T_{увед} + T_{ПНП} + T_{перекл}, \quad (2.20)$$

где $T_{увед}$ – время уведомления об отказе КС узла, ответственного за реконфигурацию путей; $T_{ПНП}$ – время, необходимое для нового поиска кратчайших путей; $T_{перекл}$ – время переключения на резервные пути.

Время уведомления об отказе КС узла, ответственного за реконфигурацию путей, $T_{увед}$ зависит от времени передачи между отдельными узлами сообщения об отказе T_p и от количества участков сети d_{ij} , между узлом, обнаружившим отказ КС (узел i), и узлом, ответственным за переключение путей (узел j) [119].

$$T_{увед} = T_p d_{ij}. \quad (2.21)$$

Время, необходимое для нового поиска кратчайших путей, $T_{ПНП}$ зависит от используемого алгоритма поиска кратчайших путей, а также размера СС.

Время переключения на резервные пути $T_{перекл}$ зависит от быстродействия маршрутизатора (коммутатора).

Таким образом, сокращение времени реконфигурации $T_{рек}$ возможно осуществить путем снижения времени уведомления об отказе КС узла, ответственного за реконфигурацию путей, $T_{увед}$ и времени, необходимого для нового поиска кратчайших путей, $T_{ПНП}$. Снижение времени уведомления об отказе КС узла, ответственного за реконфигурацию путей, $T_{увед}$ достигается путем организации возможности переключения на резервные маршруты в случае отказа КС узлом, ближайшим к этому отказу. В этом случае, согласно выражению (2.21), количество участков сети d_{ij} , между узлом, обнаружившим отказ КС, и узлом, ответственным за переключение путей, а следовательно, и сам временной показатель $T_{увед}$ будут равно нулю. Снижение времени, необходимого для нового поиска кратчайших путей, $T_{ПНП}$, достигается посредством заблаговременного поиска как кратчайших, так и резервных путей в СС и занесение их в таблицы маршрутизации.

В ходе разработки алгоритма проведена модификация алгоритма Дейкстры, и в него дополнительно внесены изменения, направленные на расширение его функциональности, связанной с формированием резервных путей в соответствии с вышеуказанными положениями. В основе предлагаемой модификации алгоритма Дейкстры лежат следующие положения.

1. При достижении очередной вершины запоминаются исходящие вершины входящих в эту вершину ребер, как потенциальные элементы будущего резервного пути к этой вершине (рис. 2.20).

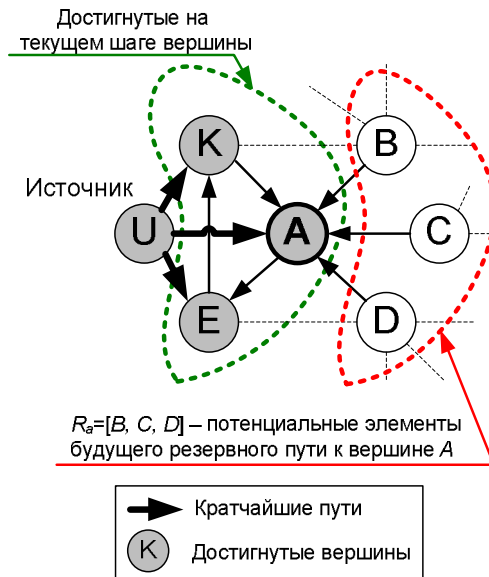
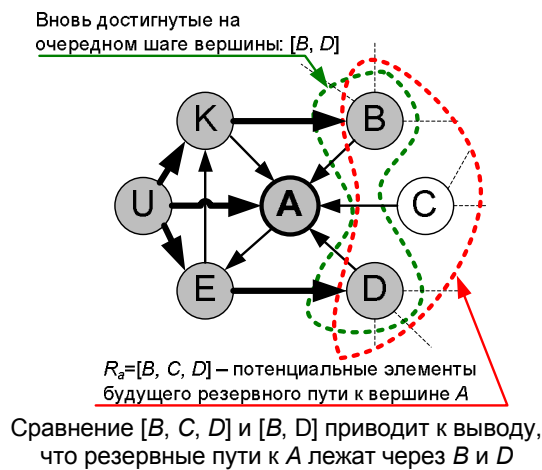


Рис. 2.20 – Запись потенциальных элементов будущего резервного пути к вершине

2. При очередном шаге функционирования алгоритма достигнутая очередная вершина проверяется как потенциальный элемент резервного пути для всех уже достигнутых вершин. Если она является потенциальным элементом резервного пути, формируется резервный путь к ранее достигнутой вершине через только что достигнутую.



Сравнение $[B, C, D]$ и $[B, D]$ приводит к выводу, что резервные пути к A лежат через B и D

Рис. 2.21 – Формирование резервного пути к вершине

3. Если к ранее достигнутой вершине уже были сформированы резервные пути и она участвует в создании нового резервного пути к очередной вершине, то к очередной вершине формируется множество резервных путей с включением в них всех возможных вариантов резервных путей сформированных ранее. Причем, если в резервный путь входит сама очередная вершина, то такой путь, во избежание циклов, в резервные не включается.

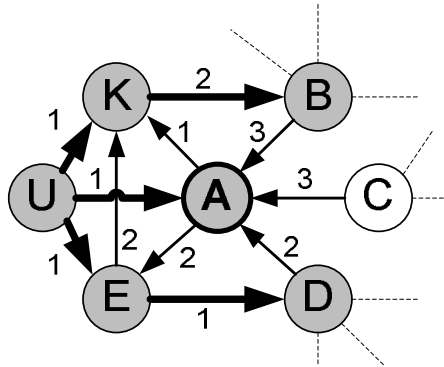


Рис. 2.22 – Пример построения резервных путей к вершине

4) Все резервные пути к вершинам сети упорядочиваются в соответствии с минимизацией весов и вносятся в таблицу маршрутизации наряду с кратчайшим путем. При отказе элементов кратчайшего пути для передачи выбирается резервный путь с минимальным суммарным весом, не содержащий отказавшие элементы (рис. 2.21).

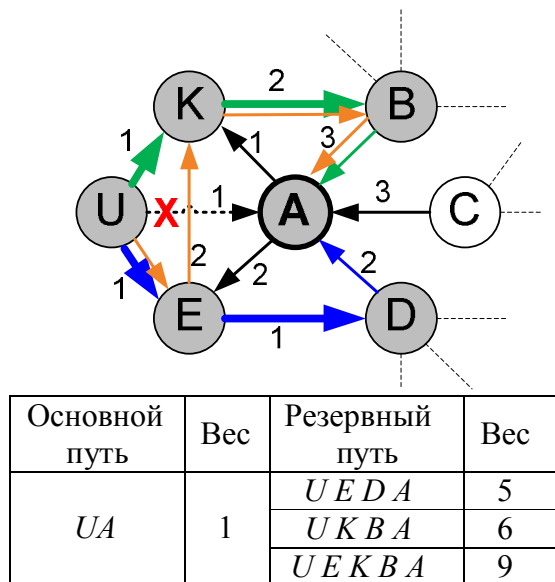


Рис. 2.23 – Пример построения резервных путей к вершине

Схема алгоритма маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности НКСС приведена на рис. 2.24.

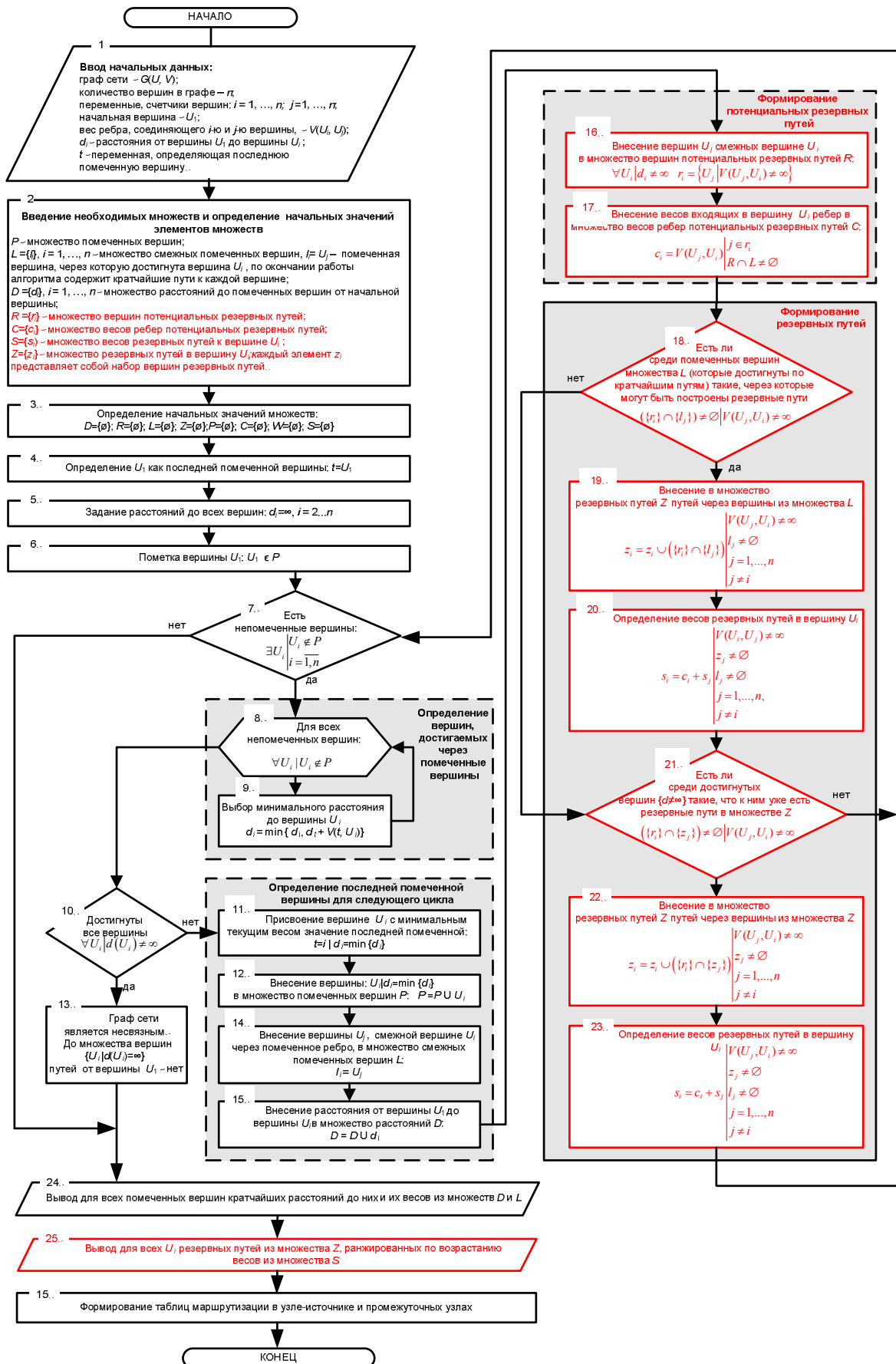


Рис. 2.24 – Схема алгоритма маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности наземно-космической сети связи

Входными параметрами алгоритма являются:

- ориентированный граф сети $G(U, V)$;
- количество вершин в графе n ;
- веса ребер, соединяющих произвольные i -ю и j -ю вершины $V(U_i, U_j)$.

Для обеспечения работы алгоритма помимо имеющихся множеств (P – множество помеченных вершин, L – множество смежных помеченных вершин, множество расстояний до помеченных и вершин от начальной вершины) вводятся следующие дополнительные множества.

1. R – множество вершин потенциальных резервных путей. В это множество вносятся достигнутые вершины, смежные рассматриваемой. В дальнейшем элементы множества используются при нахождении резервных путей.

2. C – множество весов ребер потенциальных резервных путей. В это множество вносятся веса ребер, исходящих из вершин, вносимых в множество R и входящих в рассматриваемую вершину.

3. Z – множество резервных путей в вершину, содержит резервные пути в рассматриваемую вершину, сформированные в результате проведения логических операций над входящими в него элементами и элементами множествами R и L .

4. S – множество весов резервных путей к вершине. Это множество содержит веса путей из множества Z и используется для ранжировки резервных путей при выводе результатов работы алгоритма.

К новым элементам алгоритма относятся блоки 16–23, 25. В блоках 16–17 реализуется формирование элементов множества вершин R к текущей рассматриваемой вершине за счет использования положения № 1 по модификации алгоритма. Далее в блоках 18–23, путем пересечения элементов множества R и L , а также Z , осуществляется формирование элементов множества Z с учетом положения № 2 по модификации алгоритма. В блоке 25 осуществляется ранжировка резервных путей по сумме весов, входящих в их состав ребер.

Пример, поясняющий принцип функционирования алгоритма маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности НКСС, приведен на рис. 2.25.

На нулевом шаге (рис. 2.25) представлен исходный граф и задана матрица весов ребер графа, а также значения элементов множеств, заданных в блоках 1–3 алгоритма (рис. 2.25).

На шаге 1 достигаются вершины: U_2, U_3, U_4 (для них расстояние от U_1 $d_i \neq \infty$) и помечается вершина U_4 ($t = U_4$) как имеющая наименьшее расстояние от вершины U_1 среди непомеченных вершин ($d_4 = 3$), что соответствует блокам 8, 9 алгоритма. При этом в элементы R_2, R_3, R_4 множества R вносятся смежные вершины имеющие входные ребра в вершины U_2, U_3, U_4 (в $R_2 - U_1, U_4$; в $R_3 - U_1, U_2$; в $R_4 - U_1, U_3, U_5$). Одновременно в элементы C_2, C_3, C_4 множества C вносятся веса этих ребер (в $C_2 - 4, 7$; в $C_3 - 5, 5$; в $C_4 - 3, 1, 2$). Уже на данном этапе возможно формирование резервных путей к вершинам U_2, U_3, U_4 в соответствии с блоками 16–23 алгоритма.

Рассмотрим подробно формирование резервных путей для вершины U_2 (рис. 2.26), производимое в блоках 16–23 алгоритма.

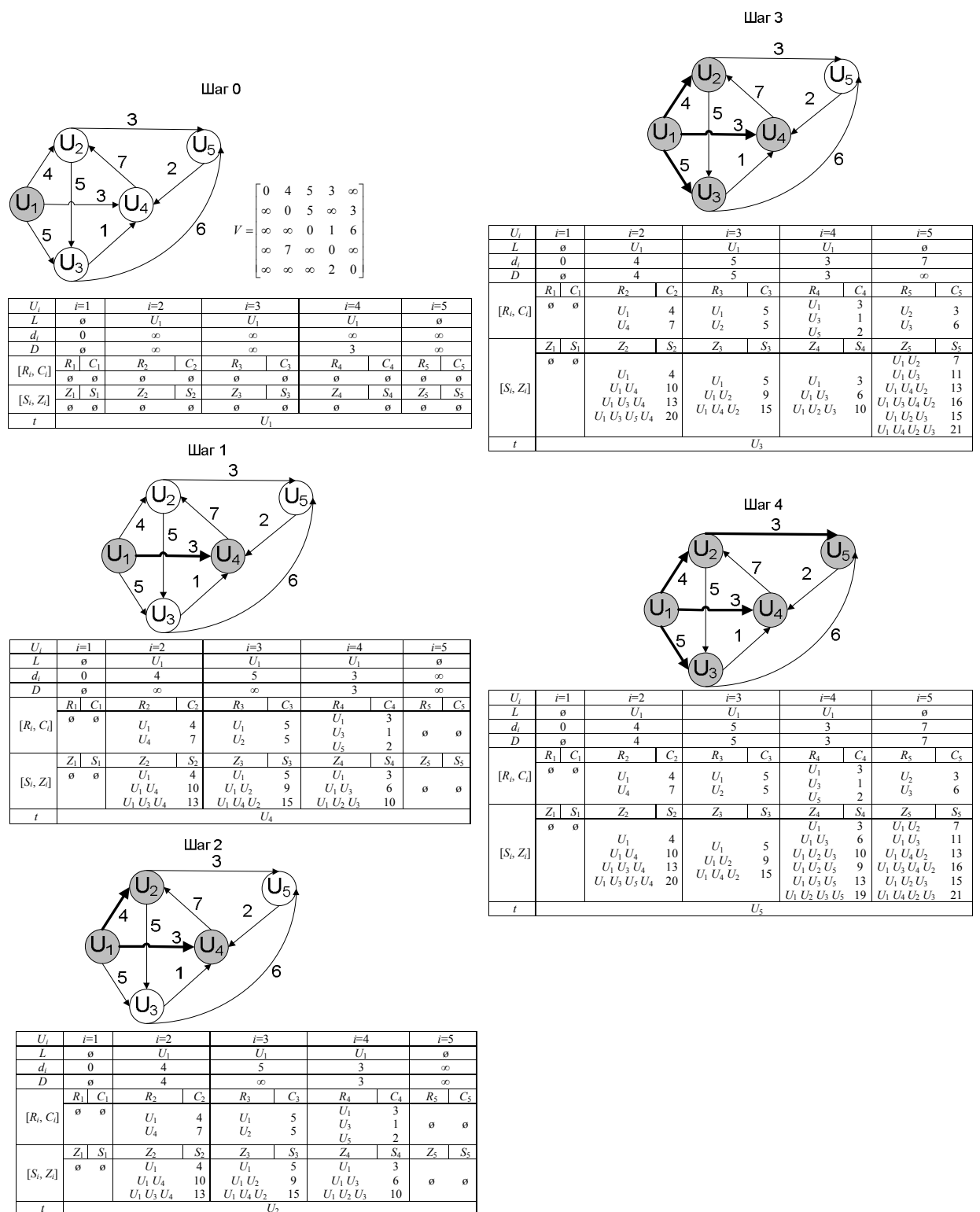


Рис. 2.25 – Пример, поясняющий принцип функционирования алгоритма

Элемент множества $r_2 \in R$ содержит две достигнутые вершины, имеющие входные в U_2 ребра: U_1 и U_4 . На данном шаге алгоритма через путь U_1 в вершину U_2 лежит кратчайший путь с минимальным суммарным весом 4. Кроме того, вершиной, через которую может быть построен резервный путь в U_2 , является вершина U_4 . Вершина U_4 достижима по кратчайшему пути на данном шаге через U_1 , и через вершины потенциальных путей U_3 и U_5 . Одна-

ко на данном шаге вершина U_5 еще не достигнута ($d_5 = \infty$), то есть в элементы s_2 путь через эту вершину добавлен не будет. Добавляются резервные пути из d_4 и s_4 идущие в U_2 через вершину U_4 :

– кратчайший путь в U_4 через U_1 ($z_2 = U_1 U_4 U_2$, $s_2 = C_2(U_4) + d_4 = 7 + 3 = 10$);

– резервный путь в U_4 через U_3 ($z_2 = U_1 U_3 U_4 U_2$, $s_2 = C_2(U_4) + z_4(U_3) = 7 + 1 + 5 = 13$);

Путь через резерв $z_4 = U_1 U_2 U_3$ не добавляется, так как он уже содержит вершину U_2 .

U_i	$i=1$	$i=2$		$i=3$		$i=4$		$i=5$		
L	\emptyset	U_1		U_1		U_1		\emptyset		
d_i	0	4		5		3		∞		
D	\emptyset	∞		∞		3		∞		
$[R_i, C_i]$	R_1	C_1	R_2	C_2	R_3	C_3	R_4	C_4	R_5	C_5
	\emptyset	\emptyset	U_1 U_4	4 7	U_1 U_2	5 5	U_1 U_3 U_5	3 1 2	\emptyset	\emptyset
$[S_i, Z_i]$	Z_1	S_1	Z_2	S_2	Z_3	S_3	Z_4	S_4	Z_5	S_5
	\emptyset	\emptyset	U_1 $U_1 U_4$ $U_1 U_3 U_4$	4 10 13	U_1 $U_1 U_2$ $U_1 U_4 U_2$	5 9 15	U_1 $U_1 U_3$ $U_1 U_2 U_3$	3 6 10	\emptyset	\emptyset

Рис. 2.26 – Пример формирования резервных путей для вершины U

На шаге 2 помечается вершина U_2 как имеющая наименьшее расстояние от вершины U_1 среди непомеченных вершин ($d_4 = 3$). Содержимое множеств R , C , Z и S не меняется.

На шаге 3 помечается вершина U_3 как имеющая наименьшее расстояние от вершины U_1 среди непомеченных вершин ($d_3 = 5$). При этом в элемент множества $R - r_4$ (вершина U_4) добавляется достигнутая смежная вершина U_5 . В элементах множества Z производится пересчет резервных путей к вершинам U_2 , U_3 , U_4 , а также внесение весов этих путей в множество S .

На шаге 4 помечается вершина U_5 как имеющая наименьшее расстояние от вершины U_1 среди непомеченных вершин ($d_7 = 5$). Алгоритм заканчивает работу, так как в графе не осталось непомеченных вершин. В результате работы алгоритма построены кратчайшие пути ко всем вершинам графа, а также найдены резервные пути к каждой вершине. Данные резервные пути ранжируются по весу (блок 25 алгоритма) и в дальнейшем могут быть использованы при отказе кратчайшего пути.

Выводы по второму разделу

1. Для повышения устойчивости НКСС на основе технологии АТМ в условиях воздействия средств РЭП можно выделить два основных направления совершенствования механизмов маршрутизации в протоколе PNNI:

– модификация алгоритма Дейкстры, лежащего в основе поиска кратчайших путей в НКСС;

– модификация алгоритма, лежащего в основе протокола обмена служебными пакетами Hello.

2. Впервые получена модель функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП, отличающиеся от известных возможностью оценки параметров КС сетевого уровня ЭМВОС как результата преднамеренных воздействий средств РЭП, с учетом схем адаптивного выбора вида модуляции сигналов и скорости помехоустойчивого кодирования.

2. Разработана модель функционирования межузлового соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП, содержащая оригинальный переход от соотношения временных интервалов сигнализации к вероятностным параметрам марковской модели, позволяющий получить аналитические выражения для зависимости вероятности нахождения межузлового соединения НКСС в работоспособном состоянии от значений временных интервалов сигнализации.

3. Разработан алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП, основанный на использовании оригинальной модели функционирования межузлового соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП для обоснования временных параметров сигнализации при заданных условиях воздействия средств РЭП. Применение данного алгоритма обеспечивает более адекватную диагностику факта подавления КС на сетевом уровне ЭМВОС, что позволяет повысить устойчивость НКСС путем динамического изменения временных интервалов сигнализации исходя из оценки интенсивности воздействия средств РЭП.

4. Разработан алгоритм маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности НКСС, отличающийся от используемого в протоколе PNNI алгоритма Дейкстры новыми функциональными элементами, обеспечивающими возможность поиска в структуре НКСС резервных путей одновременно с ведением поиска кратчайших путей, что позволяет снизить время реконфигурации путей в НКСС, вызванное подавлением КС НКСС средствами РЭП.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ НКСС В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СРЕДСТВ РЭП

3.1 Моделирование функционирования маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП

Моделирование проводилось в три этапа на основе разработанной в п. 2.2 модели функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики КС вследствие воздействия средств РЭП. Вначале исследовались канальные характеристики – пропускная способность и время передачи при изменении ОСШП. В качестве диапазона изменения ОСШП принимается интервал снижения значений функции $q(t)$. На втором этапе исследовались сетевые характеристики – метрики КС VPC, а также плотность вероятности распределения времени между отказами соединения АТМ при аналогичном допущении. На третьем этапе исследовались канальные и сетевые характеристики в условиях периодического изменения ОСШП при допущении о том, что переключение видов модуляций и соответствующих скоростей кодов происходит мгновенно (время восстановления КС $T_{\text{восст. КС}} = 0$).

Исследование влияния изменения сигнально-помеховой обстановки на пропускную способность канала SCPC.

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.15 п. 2.2, проведено исследование влияния изменения сигнально-помеховой обстановки по показателю ОСШП $q(t)$ на пропускную способность базового канала связи SCPC с шириной полосы частот $F = 8960$ Гц. Ограничения на исходные данные моделирования: $q_{\min} = -2,35$ дБ; $\Delta = 0,986$; $D_{\text{mes}} = 256$ бит; $d_{\text{сот}} = 35876$ км (ГСО).

На рис. 3.1 представлены графики изменения скорости передачи в КС $V_{1\text{Hz}}$ в расчете на 1 Гц полосы частот F при изменении ОСШП $q(t)$. Глубина изменения $q(t)$ определяется параметром q_{\min} .

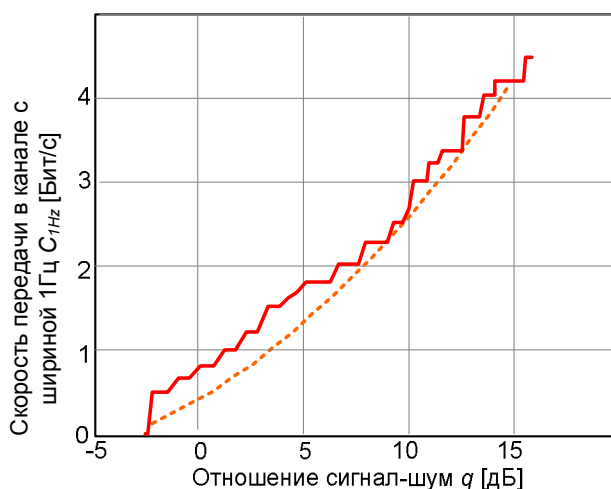


Рис. 3.1 – Изменение скорости передачи канала SCPC в расчете на 1 Гц

На рис. 3.2 представлена зависимость пропускной способности базового спутникового канала V_{SCPC} с полосой $F = 8960$ Гц, рассчитанные в п. 2.2 в

соответствии с выражением (2.2). Данная зависимость характерна для канала SCPC, в котором отсутствуют дополнительные механизмы разделения пропускной способности между абонентами.

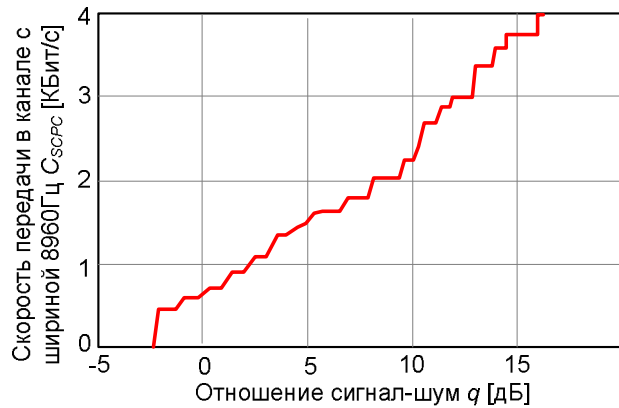


Рис. 3.2 – Изменение скорости передачи базового канала SCPC с шириной полосы $F = 8960$ Гц

Исследование влияния изменения сигнально-помеховой обстановки на скорость передачи в канале MCPC с фиксированным временным разделением абонентов.

Изменение скорости передачи в КС существенно влияет на характеристики канального уровня ЭМВОС в случае, если этот канал используется для организации сети множественного доступа. На рис. 3.3 представлены расчеты для скорости передачи в КС для сети из N абонентов, выполненные для каналов DVB-S2 в п. 2.2 в соответствии с выражением (2.3) при следующих ограничениях: $q_{\min} = -2,35$ дБ; $D_{\text{mes}} = 256$ бит; $d_{\text{сот}} = 35876$ км (ГСО); $N = 2, 4, 8$.

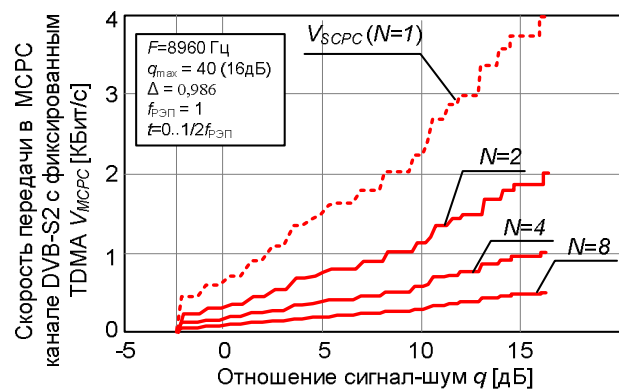


Рис. 3.3 – Изменение скорости передачи в абонентском канале связи для N абонентов

Анализ графика, представленного на рис. 3.3, показывает, что скорость передачи в абонентском канале V_{MCPC} при фиксированном временном разделении обратно пропорциональна количеству абонентов N и прямо пропорциональна значению ОСШП q .

Исследование влияния изменения сигнально-помеховой обстановки на сетевые параметры спутниковых каналов.

На рис. 3.4 представлены расчеты сетевого параметра – метрики каналов связи DVB-S2, в соответствии с выражением (2.7) п. 2.2, для случаев, когда канал связи представлен в виде канала SCPC и канала MCPC с фиксированным временным разделением абонентов (для количества абонентов $N = 2, 4, 8$).

Общие ограничения при моделировании: $q_{\min} = -2,35$ дБ; $D_{\text{mes}} = 256$ бит; $d_{\text{tot}} = 35876$ км (ГСО).

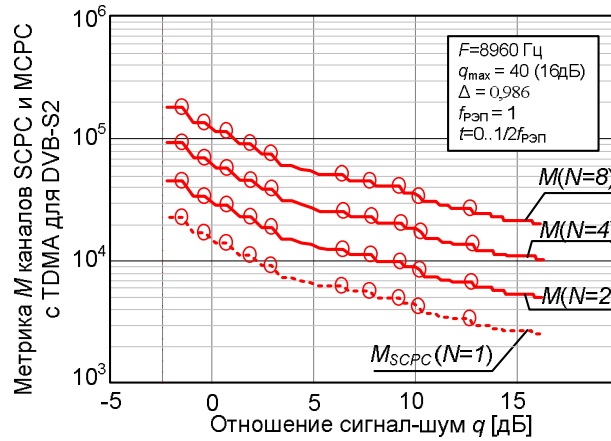


Рис. 3.4 – Оценка изменения метрики каналов связи

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 3.4, показал следующее поведение метрики канала связи $M(q)$. При фиксированном временном разделении абонентов для канала MCPC и для SCPC увеличение количества абонентов принципиально не изменяет зависимости $M(q)$, а лишь повышает значения M на величину, пропорциональную количеству абонентов N . Моменты выдачи сообщений об изменении метрики КС $M(q)$ на величину более 10 % на рисунке 3.4 обозначены значками.

Как указано в п. 2.2, элементом новизны предложенной модели является дополнительная оценка параметров сетевого уровня в условиях допущения о квази-гармоническом законе изменении пропускной способности каналов связи как результате преднамеренных помеховых воздействий. С учетом этого допущения показатель ОСШП $q(t)$ будет определяться выражением:

$$q(t) = \begin{cases} 10 \lg \left(q_{\max} \left(\frac{\Delta}{2} \cos(2\pi f_{\text{РЭП}}(t - t_{\text{PP}})) + \left(1 - \frac{\Delta}{2}\right) \right) \right), & t > t_{\text{PP}} \\ 10 \lg(q_{\max}), & t \leq t_{\text{PP}} \end{cases} \quad [\text{дБ}], \quad (3.1)$$

где q_{\max} – значение ОСШП в условиях отсутствия преднамеренных помех; Δ – значение, определяющее глубину изменения ОСШП $q(t)$ относительно базового значения q_{\max} ($\Delta = 0 \dots 1$); $f_{\text{РЭП}}$ – частота изменения показателя ОСШП $q(t)$; t_{PP} – длительность ведения радиоразведки перед циклом подавления (по умолчанию $t_{\text{PP}} = 0$).

Изменение ОСШП в соответствии с выражением (3.1) приведены на рис. 3.5. Основными параметрами преднамеренных помех, определяющими в этом случае изменение сигнально-помеховой обстановки, являются: значения

Δ , которые определяют глубину изменения ОСШП $q(t)$ относительно базового значения q_{\max} ; значения $f_{РЭП}$, которые определяют периодичность изменения показателя ОСШП $q(t)$.

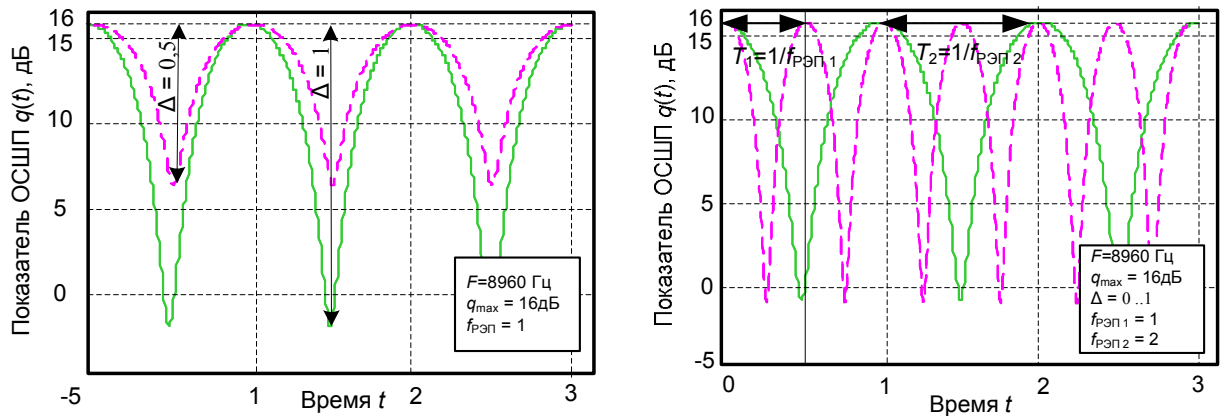


Рис. 3.5 – Изменение сигнално-помеховой обстановки по показателю ОСШП в соответствии с выражением (3.1)

В качестве итогового показателя качества функционирования канала связи на сетевом уровне в условиях изменяющейся сигнално-помеховой обстановки предлагается использовать интенсивность сообщений об изменении метрики λ_M , выдаваемых маршрутизатором на основе анализа параметров каналов связи, рассчитываемую как среднее значение количества сообщений в единицу времени:

$$\lambda_M = \frac{1}{T_{\text{набл}}} \sum_{i \in T_{\text{набл}}} N_i [c^{-1}], \quad N_i = \begin{cases} 1, & M_i \geq 1, 1M_{i-1} \\ 0, & M_i < 1, 1M_{i-1} \end{cases}. \quad (3.2)$$

Оценку интенсивности λ_M предлагается вести в два этапа. Сначала оценить интенсивность выдачи сообщений об изменении метрики λ_{M1} на длительности полупериода изменения ОСШП $q(t)$ при $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$:

$$\lambda_{M1} = \frac{1}{2f_{РЭП}} \left(\sum_{t \in [0, 1/2f_{РЭП}]} N_t \right) [c^{-1}], \quad N_t = \begin{cases} 1, & M_t \geq 1, 1M_{t-1} \\ 0, & M_t < 1, 1M_{t-1} \end{cases}, \quad (3.3)$$

а в дальнейшем оценить значение интенсивности λ_M с учетом λ_{M1} и $f_{РЭП}$ на всем этапе функционирования $t \in [0, \infty)$.

Анализируя показатель интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики КС λ_{M1} , рассчитываемый в соответствии с выражением (3.3), можно сделать следующие выводы. При фиксированном временном разделении абонентов для канала МСРС и для SCРС глубина изменения ОСШП $q(t)$, задаваемая параметром Δ в выражении, определяет интенсивность выдачи сообщений об изменении метрики КС λ_{M1} , поступающих за один полупериод воздействия $1/2f_{РЭП}$. Увеличение параметра Δ ведет к увеличению интенсивности λ_{M1} (рис. 3.6), при этом значение интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики КС на интервале $1/2f_{РЭП}$ можно аппроксимировать убывающей квази-экспоненциальной зависимостью.

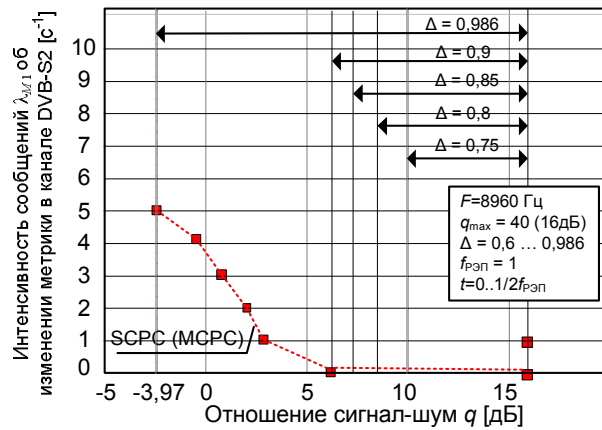


Рис. 3.6 – Оценка интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики КС λ_{M1} в зависимости от глубины изменения ОСШП

Статистическая оценка плотности вероятности выдачи сообщений об изменении метрики КС $f^*(T_{\text{отк КС}})$ на интервале $t \in [0, \infty)$ при изменении показателя ОСШП $q(t)$ в соответствии с выражением (3.1) приведено на рис. 3.7. Значения интервалов времени между поступлениями отдельных сообщений $T_{\text{отк КС}}$ нормированы к значению периода воздействия $T = 1/f_{\text{рэп}}$. Анализ графиков на рис. 3.7 показывает, что распределение времени $T_{\text{отк КС}}$ для каналов SCPC и MCPC с фиксированным временным разделением абонентов может быть аппроксимировано квази-экспоненциальной зависимостью.

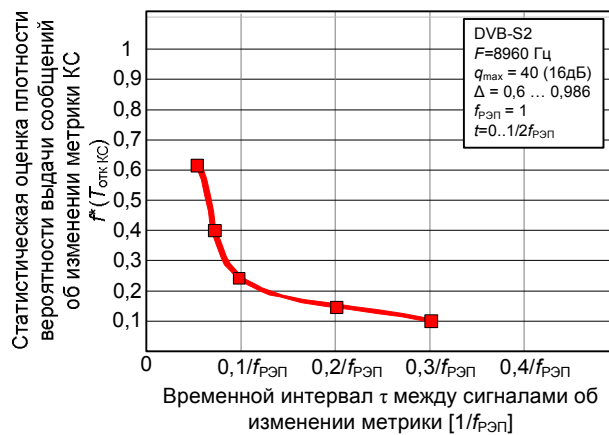


Рис. 3.7 – Статистическая оценка плотности вероятности выдачи сообщений об изменении метрики КС $f^*(T_{\text{отк КС}})$

Дополнительное исследование показало, что для канала SCPC и MCPC увеличение/уменьшение выделенной полосы частот F для каналов DVB-S2 не меняет поведение функции $M(q)$, представленное на рис. 3.4, а лишь увеличивает/уменьшает ее значения на величину, пропорциональную значению полосы частот F в выражениях. При изменении выделенной полосы частот F для указанных случаев интенсивность λ_{M1} не изменяется.

Таким образом, результаты исследования интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики канала связи λ_{M1} на интервале времени $t \in [0, 1/2f_{\text{рэп}}]$ показывают, что усложнение схемы адаптивного изменения па-

раметров канала связи (вида модуляции и скорости кодирования), а также увеличение загрузки канала множественного доступа, ведет к увеличению значения λ_{M1} .

Исследуем значения интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики канала связи λ_M на интервале времени $t \in [0, \infty)$ с учетом результатов полученных для λ_{M1} на полупериоде воздействия $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$. В случае $t \in [0, \infty)$ за каждый полупериод времени $t \in [n/2f_{РЭП}, (n + 1)/2f_{РЭП}]$, $n = 0, 1, 2, \dots$, будет происходить процесс изменения метрики, аналогичный представленному выше для полупериода $t \in [0, 1/2f_{РЭП}]$ ($n = 0$). Причем если n – нечетное, то это соответствует полупериоду снижения метрики $M(q)$, а n – четное соответствует полупериоду роста метрики $M(q)$. При этом в зависимости от настройки протокола маршрутизации сообщения об изменении метрики могут отправляться в двух случаях: при повышении метрики канала (ухудшение его качества); при изменении метрики канала связи (ухудшения или улучшения его качества). Второй случай позволяет маршрутизатору оперативно, в динамике, реагировать, в том числе, на улучшение параметров канала связи, однако это, как будет показано ниже, ведет к увеличению (удвоению) интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики канала связи.

Полная интенсивность сообщений об изменении метрики канала связи λ_M будет определяться значением интенсивности λ_{M1} и частоты воздействия $f_{РЭП}$:

– для случая реакции только на повышение метрики канала

$$\lambda_M = f_{РЭП} \lambda_{M1} [с^{-1}]; \quad (3.4)$$

– для случая реакции на изменение (повышение и снижение) метрики канала

$$\lambda_M \approx 2 f_{РЭП} \lambda_{M1} [с^{-1}]. \quad (3.5)$$

Зависимости интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики канала связи λ_M при различных частотах $f_{РЭП}$, рассчитанные для случая, определяемого выражением (3.5) для каналов DVB-S2 с SCPC, приведены на рис. 3.8.

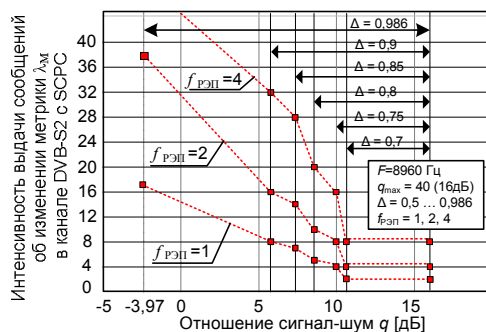


Рис. 3.8 – Зависимость интенсивности λ_M выдачи сообщений об изменении метрики канала связи при различных частотах $f_{РЭП}$

Анализ графических зависимостей на рис. 3.8 показывает, что увеличение частоты воздействия $f_{РЭП}$ ведет к пропорциональному увеличению интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики канала связи λ_M . Инте-

ресным выводом по графическим зависимостям, представленным на рисунке 3.8, является то, что одно и то же значение интенсивности λ_M может быть достигнуто как за счет изменения энергетических параметров ОСШП через параметр Δ , так и за счет увеличения частоты воздействия $f_{РЭП}$ при ограниченном диапазоне глубины изменения ОСШП (рис. 3.9).

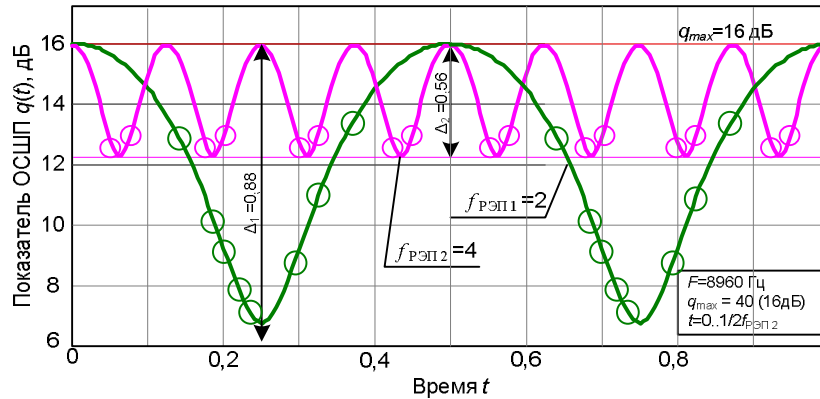


Рис. 3.9 – Варианты достижения интенсивности $\lambda_M = 16$:

- 1) $\Delta_1 = 0,88, f_{РЭП1} = 2$; 2) $\Delta_1 = 0,56, f_{РЭП1} = 4$

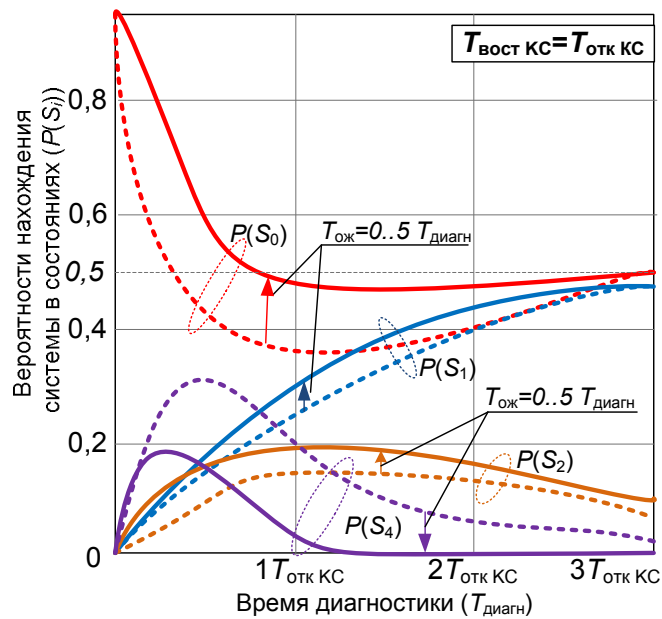
Проведенное моделирование показало, что при фиксированном временном разделении абонентов для КС МСРС и SCРС периодическое снижение показателя ОСШП $q(t)$ ведет к снижению пропускной способности каналов связи DVB-S2 и, как следствие, росту интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики КС λ_M . Значение снижения пропускной способности каналов связи DVB-S2 определяется параметром глубины изменения ОСШП Δ , а значение интенсивности λ_M определяется параметрам Δ и частотой изменения ОСШП $f_{РЭП}$.

Увеличение сложности схемы адаптивного выбора вида модуляции и скорости помехоустойчивого кодирования существенно увеличивают диапазоны значений канальных и сетевых параметров, в котором наблюдаются проявление негативных эффектов от динамического изменения ОСШП.

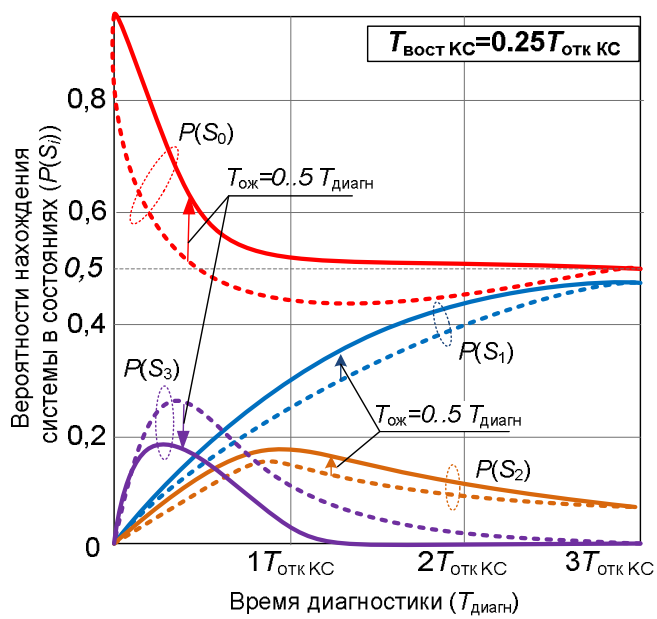
Показана возможность формирования нового вида помеховых воздействий, обладающих низкой энергоемкостью ($\Delta = 0,6 \dots 0,8$, что соответствует $q(t) = 16 \dots 4$ дБ) при заданных частотно-временных параметрах, которые, как показано в исследованиях [74, 85, 86], должны соответствовать временным параметрам функционирования маршрутизатора и составляют значения $1 \dots 10$ с ($f_{РЭП} = 1 \dots 0,1$ Гц). Исследованы эффекты от таких воздействий средств РЭП на сетевом уровне ЭМВОС в виде изменения параметра интенсивности выдачи сообщений об изменении метрики канала связи λ_M и показано, что распределение времени выдачи сообщений об изменении метрики КС $T_{отк\ КС}$ для каналов SCРС и МСРС с фиксированном временным разделением абонентов может быть аппроксимировано квази-экспоненциальной зависимостью.

3.2 Моделирование функционирования межсетевого соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП

В соответствии с разработанной в п. 2.3 моделью функционирования межсетевого соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП исследуем поведение конечных вероятностей состояний системы $P(S_i)$, определяемых в соответствии с выражениями (2.8–2.16). Результаты исследования зависимости $P(S_i)$ от значений $T_{\text{диагн}}$ и $T_{\text{ож}}$, нормированных к среднему времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, при различных значениях $T_{\text{вост КС}}$ с учетом следующих ограничений: $T_{\text{отк КС}} = 1$; $T_{\text{диагн}} = 1T_{\text{отк КС}} \dots 3T_{\text{отк КС}}$; $T_{\text{ож}} = 1T_{\text{диагн}} \dots 5T_{\text{диагн}}$; $T_{\text{рек}} = 10T_{\text{отк КС}}$; $T_{\text{вост КС}} = 0,01T_{\text{отк КС}}, 0,25T_{\text{отк КС}}, 1T_{\text{отк КС}}$ приведены на рис. 3.10, а–в.



а)



б)

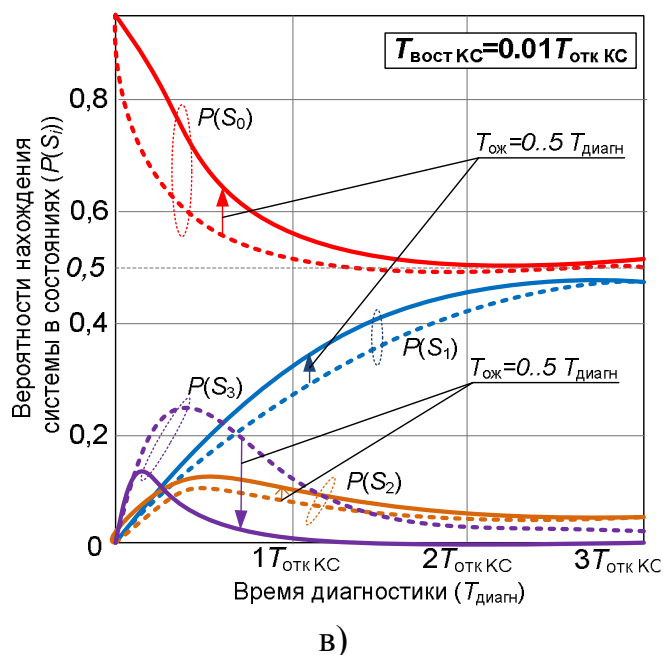


Рис. 3.10 – Зависимости конечных вероятностей состояний системы $P(S_i)$ от $T_{\text{диагн}}$, $T_{\text{ож}}$, $T_{\text{восст КС}}$

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 3.10, а–в, позволяет сделать следующие выводы.

1. Отношение $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}}$ влияет на быстроту схождения $P(S_i)$ к предельным значениям. При $T_{\text{ож}} = 0T_{\text{диагн}}$, значения $P(S_0)$, $P(S_1)$, $P(S_2)$ достигают своего минимального значения, а $P(S_3)$ – максимального. Увеличение этого отношения выше значения $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}} = 5$ не влияет на значения вероятностей нахождения системы в различных состояниях $P(S_i)$.

2. При увеличении значений $T_{\text{диагн}}$ вероятность работоспособного состояния $P(S_0)$ снижается и стремится к своему предельному значению $P(S_0) \rightarrow 0,5$. При этом значение времени восстановления КС $T_{\text{восст КС}}$ определяет наличие и значение минимума функции $P(S_0)$.

3. Уже при значениях $T_{\text{диагн}} = 0,25T_{\text{отк КС}}$ ($T_{\text{ож}} = 5T_{\text{диагн}}$) значение вероятности нахождения в работоспособном состоянии $P(S_0)$ принимает критическое значение $P(S_0) = 0,9$, а при меньшем значении $T_{\text{ож}} < 5T_{\text{диагн}}$ происходит снижение значений вероятности до $P(S_0) < 0,9$, что является неприемлемым значением для коэффициента готовности ИНС K_{Γ} .

4. При уменьшении $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ снижается влияние значение среднего времени восстановления КС $T_{\text{восст КС}}$ на вероятности $P(S_i)$, а при $T_{\text{диагн}} \leq 0,01T_{\text{отк КС}}$ вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии $P(S_0)$ практически от $T_{\text{восст КС}}$ не зависит.

Исследование поведения конечных вероятностей состояний системы $P(S_i)$ при ограничениях на $T_{\text{диагн}}$ и $T_{\text{ож}}$ в зависимости от значений $T_{\text{восст КС}}$ и отношения $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ с учетом следующих ограничений: $T_{\text{отк КС}} = 1$; $T_{\text{диагн}} = 0,01T_{\text{отк КС}}$, $0,1T_{\text{отк КС}}$, $0,3T_{\text{отк КС}}$, $1T_{\text{отк КС}}$; $T_{\text{ож}} = 0T_{\text{диагн}} \dots 5T_{\text{диагн}}$; $T_{\text{рек}} = 10 T_{\text{отк КС}}$; $T_{\text{восст КС}} = 0 \dots 1$ приведены на рис. 3.11, а–в.

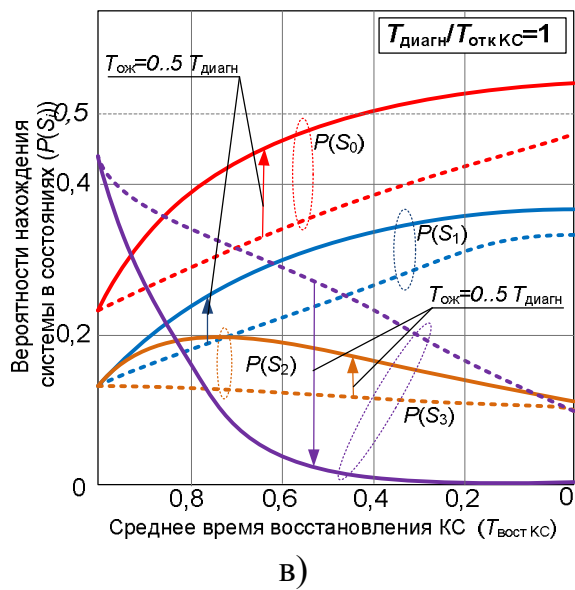
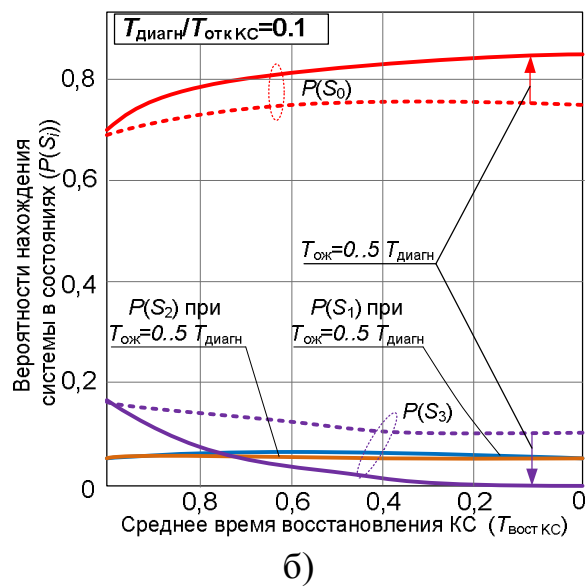
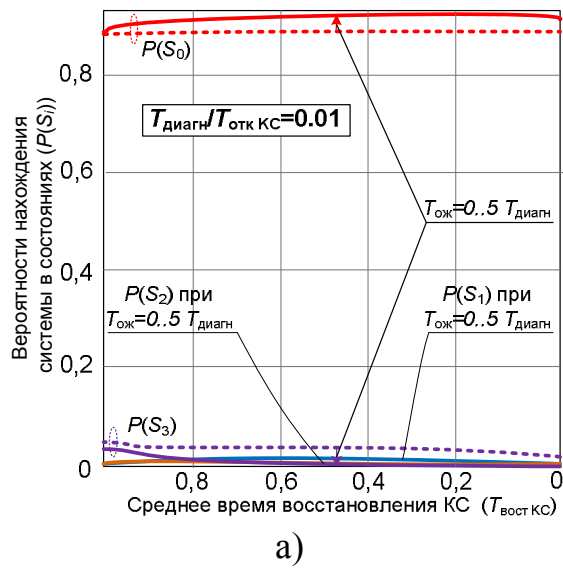


Рис. 3.11 – Зависимость конечных вероятностей состояний от $T_{\text{восст КС}}$ при фиксированных значениях $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 3.11, показывает, что при уменьшении $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ снижается влияние значения времени восстановления КС $T_{\text{вост КС}}$ на вероятности $P(S_i)$, а при $T_{\text{диагн}} \leq 0,01T_{\text{отк КС}}$ вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии $P(S_0)$ практически от $T_{\text{вост КС}}$ не зависит. Таким образом, сокращение времени восстановления КС $T_{\text{вост КС}}$ для повышения $P(S_0)$ целесообразно лишь при значениях временного интервала диагностики $T_{\text{диагн}} > 0,01 T_{\text{отк КС}}$.

С ростом времени ожидания восстановления связи в ИНС $T_{\text{ож}}$ растет вероятность работоспособного состояния $P(S_0)$, так как в этом случае возрастает переходная вероятность p_{20} , то есть увеличивается вероятность того, что система успеет перейти из состояния ожидания S_2 в работоспособное состояние S_0 , минуя состояние реконфигурации S_3 . В отдельных случаях повышение значения $T_{\text{ож}}$ от 0 до $5T_{\text{диагн}}$ позволяет повысить вероятность работоспособного состояния $P(S_0)$ на 15–20 %.

Основным параметром, определяющим наиболее сложные условия функционирования объекта связи, являются значения среднего времени между отказами КС, удовлетворяющие условию $T_{\text{отк КС}} \leq 10T_{\text{диагн}}$. Условия функционирования, соответствующие значениям $T_{\text{отк КС}} \leq 10T_{\text{диагн}}$, $T_{\text{отк КС}} \leq T_{\text{вост КС}}$ еще более усугубляет деструктивное воздействие отказов КС на соединение АТМ, и минимизирует значение вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии $P(S_0)$.

Результаты моделирования функционирования соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП, соответствующих требованиям по устойчивости НКСС, приведены на рисунках 3.12–3.14. Анализ рис. 3.12 показывает, что изменение $T_{\text{вост КС}}$ не оказывает существенного влияния на отношение $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$, необходимого для обеспечения требуемого уровня K_{Γ} . Таким образом, при дальнейшем моделировании значения $T_{\text{вост КС}}$ будем полагать, что восстановление КС происходит мгновенно ($T_{\text{вост КС}} = 0$).

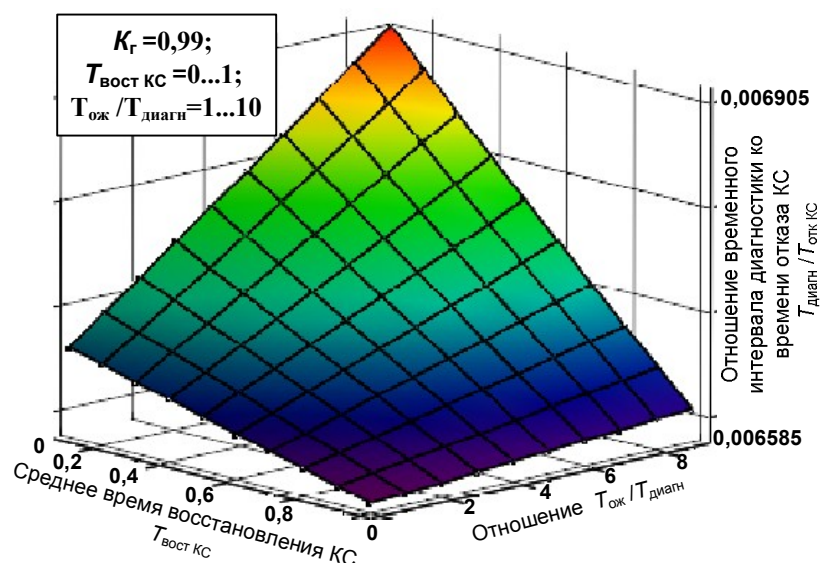


Рис. 3.12 – Зависимость требуемого значения $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ для обеспечения значения K_{Γ} при различных значениях отношения $T_{\text{вост КС}}$.

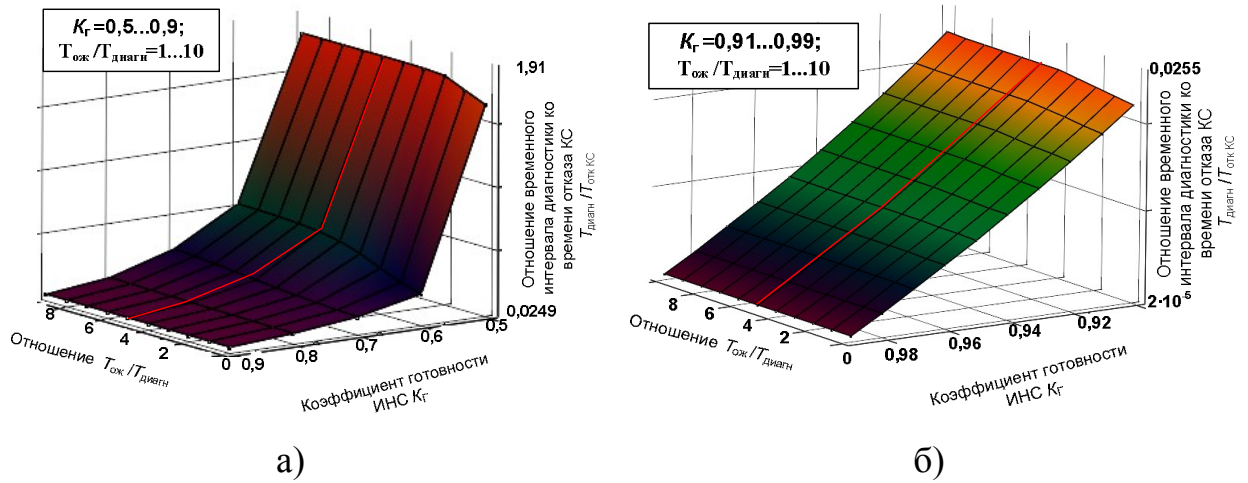


Рис. 3.13 – Зависимость требуемого отношения $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ для обеспечения значения K_r при различных значениях отношения $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}}$

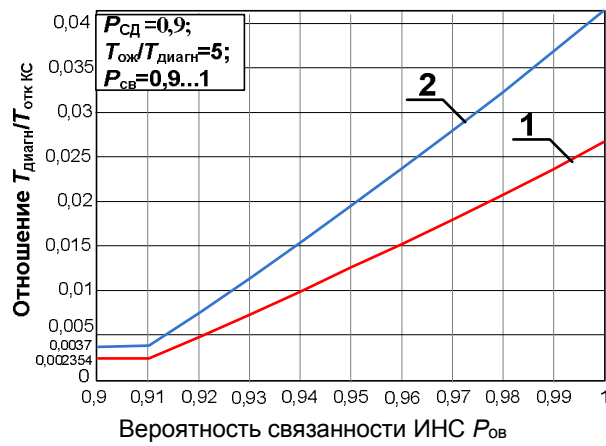


Рис. 3.14 – Зависимости требуемых отношений $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ для обеспечения значения $P_{\text{сд}}$ при различных значениях $P_{\text{св}}$ без использования разработанного алгоритма маршрутизации (1) и с использованием разработанного алгоритма маршрутизации (2)

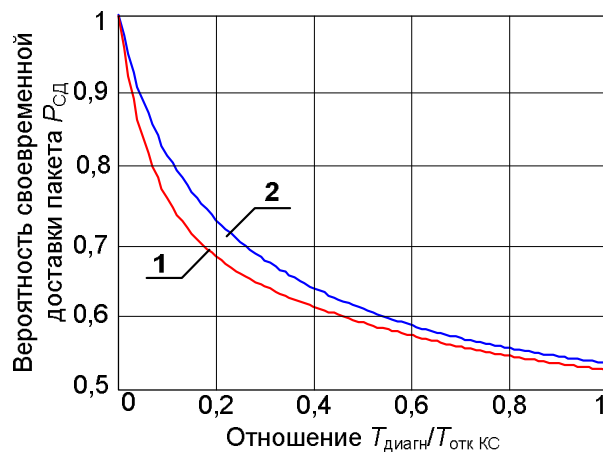


Рис. 3.15 – Зависимость $P_{\text{сд}}$ от отношения $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ без использования разработанного алгоритма маршрутизации (1) и с использованием разработанного алгоритма маршрутизации (2)

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 3.13, позволяет сделать вывод о том, что изменение отношения $T_{ож}/T_{диагн}$ влияет на повышение $T_{диагн}/T_{отк КС}$ лишь до значения $T_{ож}/T_{диагн} = 5$ (отмечено на графиках красной линией). Таким образом, целесообразно установить отношение $T_{ож}/T_{диагн} = 5$ и использовать его в ходе работы алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП (п. 2.4).

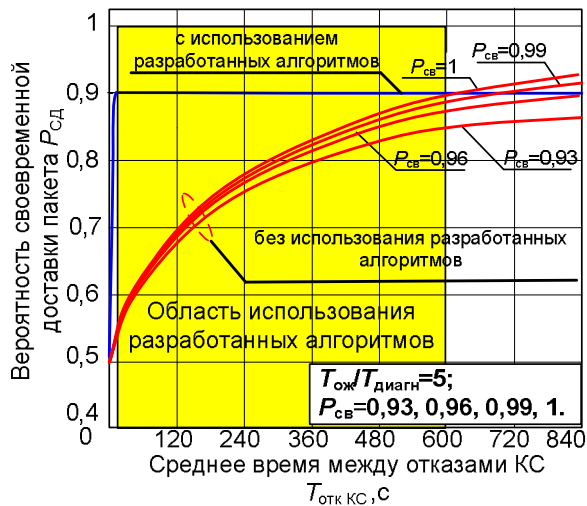
С учетом обоснованных выше значений $T_{вост КС}$ и $T_{ож}/T_{диагн}$, построены зависимости требуемого значения $T_{диагн}/T_{отк КС}$ от $P_{св}$ при заданном значении вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ без использования разработанного алгоритма маршрутизации и с его использованием (рис. 3.14). Анализ представленных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что использование разработанного алгоритма маршрутизации позволяет повысить отношение $T_{ож}/T_{диагн}$, при котором обеспечивается заданный уровень вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}^{зад}$, на 63–64 %, в зависимости от значения вероятности связности ИНС $P_{св}$. Вследствие этого прирост вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ при использовании разработанного алгоритма маршрутизации, представленный на рис. 3.15, может достигать 7 %, в зависимости от имеющегося отношения $T_{диагн}/T_{отк КС}$.

3.3 Оценка повышения устойчивости связи при использовании разработанного НМА и формирование граничных условий его применения

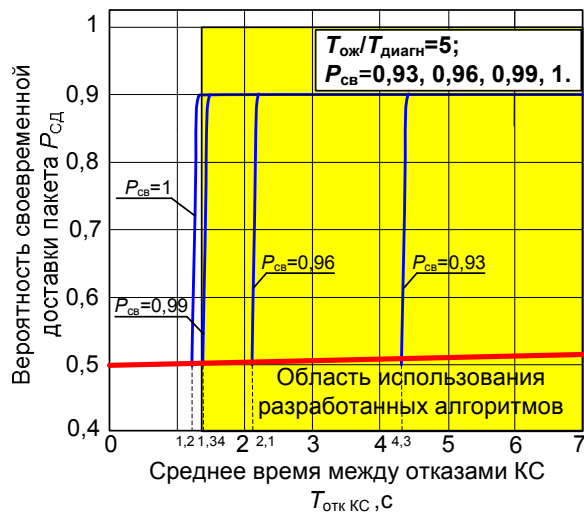
Оценка повышения устойчивости связи при использовании разработанного НМА в виде алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП и алгоритма маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности НКСС производилась на основе целевых показателей вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ и показателя эффективности использования разработанных алгоритмов E_y , формализованных в п. 1.3. Графические зависимости изменения вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ без использования разработанных алгоритмов и с использованием разработанных алгоритмов представлены на рис. 3.16, а–б. В ходе моделирования установлены обоснованные в п. 3.2 значения времени восстановления КС $T_{вост КС} = 0$ и отношения временного интервала ожидания восстановления связи к временному интервалу диагностики $T_{ож}/T_{диагн} = 5$, таким образом, приняты следующие условия моделирования: используется разработанный алгоритм маршрутизации, $P_{св} = 0,93; 0,96; 0,99; 1$, $P_{сд}^{зад} = 0,9$. Кроме того, показано влияние вероятности связности ИНС $P_{св}$ на значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$. Анализ представленных графических зависимостей показывает, что разработанные алгоритмы позволяют обеспечить заданное значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}^{зад} = 0,9$ при значении среднего времени между отказами КС $T_{отк КС}$ большим, нежели значение, при котором рассчитанное с помощью алгоритма адаптивного

изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП значение времени диагностики отказа ИНС $T_{\text{диагн}}$ будет превышать пороговое значение, равное 50 мс, обоснованное в п. 2.4. Снижение вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$ в случае, когда не используется разработанный алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации, приводит к снижению вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}$ (рис. 3.16, а). В случае, если используется разработанный алгоритм адаптивного изменения временных параметров в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП, снижение вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$ приводит к снижению минимального возможного среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$ при котором будет обеспечиваться $P_{\text{сд}}^{\text{зад}} = 0,9$ (рис. 3.16, б).

Вместе с тем, как показано на рис. 3.16, а, при превышении среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$ значения 600 с, протокол PNNI без применения разработанных алгоритмов позволяет обеспечить заданный уровень вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}$.



а)



б)

Рис. 3.16 – Зависимость $P_{\text{сд}}$ от $T_{\text{отк КС}}$ без использования разработанных алгоритмов и с использованием разработанных алгоритмов

На рис. 3.17 представлена зависимость показателя эффективности использования разработанных алгоритмов E_y от среднего времени между отказами КС $T_{отк\ КС}$. При этом принято допущение о том, что воздействие средств РЭП не способно осуществить подавление всех путей в ИНС, т.е. вероятность связности ИНС $P_{св} = 1$, что является наиболее благоприятным условием для случая, когда не используются разработанные алгоритмы (см. рис. 3.15, а).

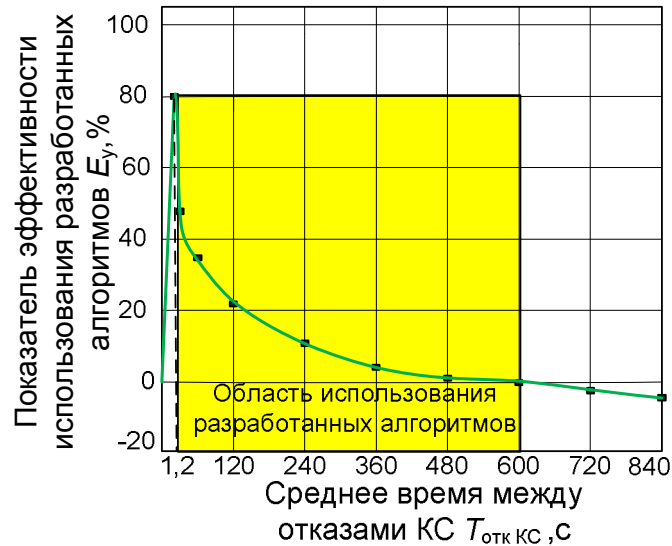


Рис. 3.17 – Зависимость E_y от $T_{отк\ КС}$

Анализ представленной зависимости позволяет сделать вывод о том, максимальная эффективность использования разработанных алгоритмов в заданных условиях моделирования $E_y = 80\%$ достигается при значении среднего времени между отказами $T_{отк\ КС}$, близком к наименьшему значению $T_{отк\ КС} = 1,2$ с, при котором обеспечивается заданное значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}^{зад}$. При превышении значения среднего времени между отказами $T_{отк\ КС}$ уровня 600 с, применение разработанных алгоритмов становится неэффективным. Кроме того, как показано выше, применение разработанного алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП в том случае, когда значение среднего времени между отказами $T_{отк\ КС}$ не превышает порогового (в условиях моделирования $T_{отк\ КС} = 1,2$ с) невозможно. Вместе с тем, как показано на рис. 3.15, использование разработанного алгоритма маршрутизации в этом случае позволяет повысить значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$ на величину до 7 %, в зависимости от необходимого отношения $T_{диагн}/T_{отк\ КС}$.

Таким образом, формирование граничных условий применения разработанных алгоритмов включает в себя определение нижнего и верхнего порога временного диапазона, при соответствии которому среднего времени между отказами $T_{отк\ КС}$ использование каждого из алгоритмов в отдельности и совместное их использование эффективно с точки зрения повышения значения вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$. Анализ графических

зависимостей, представленных на рис. 3.14–3.17, позволяет сделать вывод о том, что разработанный алгоритм маршрутизации может использоваться при любых значениях среднего времени между отказами $T_{\text{отк КС}}$, в то время как алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации не может быть использован в случае, если определенное с его помощью время диагностики отказа ИНС $T_{\text{диагн}}$ не превысит значения 50 мс. При самом неблагоприятном случае, когда структура СС характеризуется коэффициентом вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$, стремящейся к заданному значению вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}^{\text{зад}} = 0.9$, а следовательно, необходимо обеспечить значение коэффициента готовности ИНС $K_{\text{г}}$ близкое к 1, отношение временного интервала диагностики к среднему времени между отказами КС $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$, как показывает кривая 1 на рис. 3.14, должно составлять $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}} \approx 0,002354$. Данное отношение позволяет определить нижний порог диапазона среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, примерно равный 21 с. Верхний порог диапазона среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, до достижения которого использование алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации эффективно, зависит от заданного значения вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{сд}}^{\text{зад}}$ и вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$. Согласно требованиям, предъявляемым к устойчивости НКСС для обеспечения выполнения требований по своевременности информационного обмена в СУВО, значение вероятности своевременной доставки пакета должно быть не ниже значения 0,9 ($P_{\text{сд}} \geq 0,9$). Значения верхнего порога диапазона среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, до достижения которого использование алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации эффективно, в зависимости от вероятности связности ИНС $P_{\text{св}}$ приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Значения верхнего порога диапазона $T_{\text{отк КС}}$

$P_{\text{св}}$	$\approx 0,9$	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1
Верх. порог $T_{\text{отк КС}}$, с	14400	7200	3600	2280	1650	1320	1050	900	840	720	600

Анализ значений, представленных в табл. 3.2, показывает, что наименьшее значение верхнего порога диапазона среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, до достижения которого использование алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации в соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП, соответствует условиям, когда структура НКСС характеризуется вероятностью связности ИНС $P_{\text{св}}$.

Наибольшее значение нижнего порога диапазона среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$, при котором возможно совместное использование алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации и разработанного алгоритма маршрутизации согласно графической зависимо-

сти, представленной на рис. 3.14, в условиях самого неблагоприятного случая, когда структура СС характеризуется вероятностью связности ИНС $P_{св}$, стремящейся к заданному значению вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}^{ан} = 0.9$, определяется отношение времени диагностики отказа ИНС к среднему времени между отказами КС $T_{диагн}/T_{отк\ КС} \approx 0,0037$ и составляет примерно 14 с. Наименьшее значение верхнего порога диапазона среднего времени между отказами КС $T_{отк\ КС}$ соответствует аналогичному значению для случая использования только алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации в соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП и составляет 600 с.

3.4 Модификация протокола маршрутизации PNNI в составе стека протоколов АТМ

Полученные в ходе диссертационных исследований результаты, обладающие научной новизной, использованы для модификации протокола маршрутизации PNNI в составе стека протоколов АТМ. Как показано ранее (п. 2.1), протокол PNNI позволяет осуществлять как поиск кратчайших путей, используя алгоритм Дейкстры, так и диагностику работоспособности КС, используя протокол Hello. Таким образом, модификацию протокола PNNI можно разделить на две составляющие:

- модификацию протокола PNNI в части протокола сигнализации;
- модификацию протокола PNNI в части протокола поиска кратчайших путей.

При модификации протокола PNNI в части протокола сигнализации важно учесть, что планируется создание системы мониторинга сигнально-помеховой обстановки. Функции, возлагаемые на эту систему, в достаточной мере коррелируют с назначением протокола сигнализации.

Система мониторинга сигнально-помеховой обстановки служит для обеспечения эффективной работы станций спутниковой связи и позволяет при организации связи исключить пораженные преднамеренными и непреднамеренными помехами участки частотного диапазона из работы [13]. Также система мониторинга сигнально-помеховой обстановки позволяет выявить факт постановки противником преднамеренных помех и перевести систему в более помехозащищенный режим или исключить пораженные частоты из работы. Для определения правильной стратегии радиопротиводействия необходимо получать достоверные данные о сигнально-помеховой обстановке.

Каждый приемный тракт на выходе антенны в X-диапазоне имеет частотную полосу 500 МГц и в Ka-диапазоне имеет частотную полосу 2 ГГц. Приемное устройство КАС должно проводить мониторинг в вышеуказанных полосах. Учитывая, что информационная полоса по приему в КАС составляет значение 36 МГц, обзор более широкой полосы нужно производить последовательно. Для этого КАС должен последовательно управлять синтезаторами частот в ствольной части бортового ретрансляционного комплекса для обзора более ши-

рокой полосы. Время, необходимое для обзора полосы 36 МГц, составляет порядка 10 мс с разрешением 1 кГц. Обзор полосы 500 МГц потребует времени 140 мс, а обзор полосы 2 ГГц потребует времени 560 мс.

При создании системы мониторинга сигнально-помеховой обстановки планируется проводить мониторинг частотного диапазона по двум вариантам [13]:

- в определенный момент времени в течение 140–560 мс прекращается передача по КС, при этом все спутниковые станции принимают в групповом сигнале запрет работать на излучение. По истечении этого времени сеть связи продолжает функционировать;

- при разработке частотно-временного ресурса задаются временные окна, которые резервируются для мониторинга. Данные временные окна могут быть синхронны с циклом ППРЧ. Размер данного временного окна равен длительности передачи информационного пакета. Его длина может быть от 1,6 мс до 100 мкс. Передача информации в эти короткие интервалы времени также не производится. Данные временные окна циклически повторяются. Использование данных временных окон может динамически меняться по команде центральной станции. То есть они могут использоваться и для связи, и для мониторинга. В этом случае, если использовать временные окна со скважностью 1:1000, что составит 0,1 % пропускной способности, время анализа радиочастотного спектра в полосе 2 ГГц составит около 1 мин. При этом варианте мониторинга прекращение функционирования сети связи не происходит.

Таким образом, система мониторинга сигнально-помеховой обстановки позволяет получать данные о временных характеристиках воздействий средств РЭП, необходимых для корректной работы алгоритма адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП, однако не осуществляет мониторинг изменения метрики КС. В связи с этим предлагается дополнить систему мониторинга сигнально-помеховой обстановки протоколом сигнализации Hello, использующим для определения временных интервалов диагностики и ожидания восстановления связи разработанный ходе диссертационных исследований алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП. Обмен служебными пакетами в НКСС согласно протоколу сигнализации Hello позволит своевременно определять величину изменения основной характеристики сетевого уровня – метрики КС, а также диагностировать факт полного подавления КС. Применение протокола сигнализации Hello, использующего алгоритм адаптивного изменения временных параметров сигнализации в межузловом соединении НКСС в условиях воздействия средств РЭП, кроме того, ограничит объем служебного трафика, циркулирующего по КС НКСС, что позволит более эффективно использовать имеющуюся пропускную способность КС.

Модификация протокола PNNI в части протокола поиска кратчайших путей включает в себя использование разработанного алгоритма маршрути-

зации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности НКСС, позволяющего одновременно с поиском кратчайших путей осуществлять поиск резервных путей и соответствующее перенаправление информационных потоков. Рассмотрим применение модифицированного протокола PNNI для поиска кратчайших и резервных путей в НКСС, имеющего, с учетом обоснованных в п. 1.3 основных рамок исследований, вид, приведенный на рис. 3.18, а.

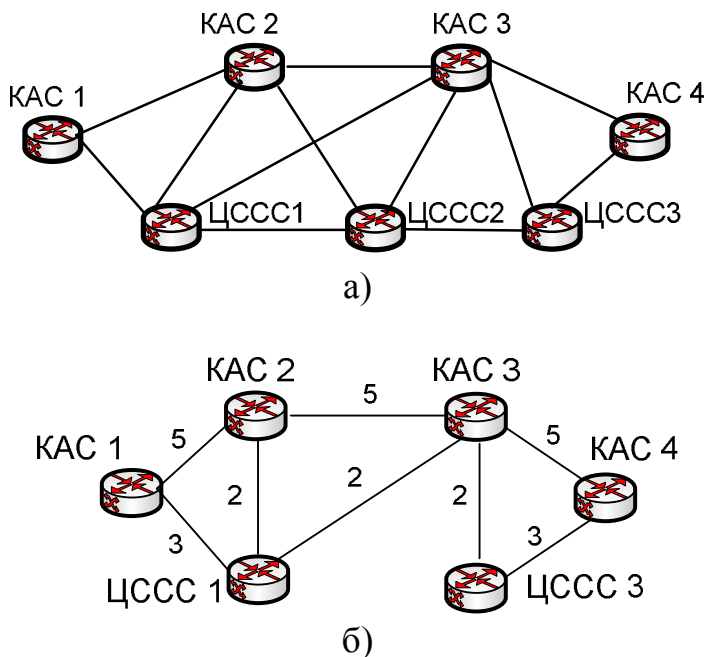


Рис. 3.18 – Схематичное отображение НКСС

Предположим, что в результате воздействия противника ЦССС2 была уничтожена, кроме того, исключена возможность передачи трафика через транспортную сеть наземного эшелона ОАЦСС ВС РФ. Тогда схематичное отображение НКСС примет вид, представленный на рис. 3.18, б. Метрики КС в составе НКСС присвоены случайным образом. При использовании алгоритма Дейкстры, описанного в п. 2.1, таблицы маршрутизации в коммутаторах, входящих в состав ЦССС, будут иметь вид, представленный в табл. 3.3. Таблица маршрутизации коммутатора в составе КАС 3 представлена в табл. 3.4. Таблицы маршрутизации коммутаторов в составе КАС, не входящих в состав кратчайшего пути, информации не содержат.

Таблица 3.3 – Таблицы маршрутизации коммутаторов в составе ЦССС 1 и ЦССС 3

	Основные пути	
	Состав пути	Метрика пути
ЦССС 1	ЦССС 1 – КАС 3 – ЦССС 3	4
ЦССС 3	ЦССС 3 – КАС 3 – ЦССС 1	4

Таблица 3.4 – Таблица маршрутизации коммутатора в составе КАС 3

ИНС	Основной путь	
	Состав пути	Метрика пути
ЦССС 1 – ЦССС 3	КАС 3 – ЦССС 3	2
ЦССС 3 – ЦССС 1	КАС 3 – ЦССС 1	2

При подавлении КС будет осуществляться поиск нового кратчайшего пути, не включающего в себя подавленный КС, коммутатором, входящим в состав ЦССС – отправителя информации. Например, если при передаче от ЦССС 1 к ЦССС 3 был подавлен КС КАС 3 – ЦССС 3, то производится уведомление ЦССС 1 о факте подавления, и поиск нового кратчайшего пути осуществляется без учета этого КС. Результатом этого поиска будет путь: ЦССС 1 – КАС 3 – КАС 4 – ЦССС 3. После обновления таблицы маршрутизации коммутатора в составе КАС 3 (удаление пути КАС 3 – ЦССС 3 и добавление пути КАС 3 – КАС 4) и таблицы маршрутизации коммутатора в составе КАС 4 (добавление пути КАС 4 – ЦССС 3) осуществляется переключение на этот путь, и информация будет передаваться по нему вплоть до факта подавления КС, входящих в его состав.

При использовании алгоритма маршрутизации информационных потоков по кратчайшим и резервным путям на основе использования структурной избыточности НКСС, описанного в п. 2.5, при поиске кратчайшего пути осуществляется также поиск резервных путей. Таким образом, таблицы маршрутизации в коммутаторах, входящих в состав ЦССС, будут иметь вид, представленный в табл. 3.5.

Таблица 3.5 – Таблицы маршрутизации в коммутаторах в составе ЦССС 1 и ЦССС 3

	Основные пути		Резервный путь	
	Состав пути	Метрика пути	Состав пути	Метрика пути
ЦССС 1	ЦССС 1 – КАС 3 – ЦССС 3	4	1. ЦССС 1 – КАС 2 – КАС 3 – ЦССС 3 2. ЦССС 1 – КАС 3 – КАС 4 – ЦССС 3 3. ЦССС 1 – КАС 2 – КАС 3 – КАС 4 – ЦССС 3 4. ЦССС 1 – КАС 1 – КАС 2 – КАС 3 – ЦССС 3 5. ЦССС 1 – КАС 1 – КАС 2 – КАС 3 – КАС 4 – ЦССС 3	9 10 15 15 21
ЦССС 3	ЦССС 3 – КАС 3 – ЦССС 1	4	1. ЦССС 3 – КАС 3 – КАС 2 – ЦССС 1 2. ЦССС 3 – КАС 4 – КАС 3 – ЦССС 1 3. ЦССС 3 – КАС 4 – КАС 3 –	9 10 15 15

			КАС 2 – ЦССС 1 4. ЦССС 3 – КАС 3 – КАС 2 – КАС 1 – ЦССС 1 5. ЦССС 3 – КАС 4 – КАС 3 – КАС 2 – КАС 1 – ЦССС 1	21
--	--	--	--	----

Таблицы маршрутизации коммутаторов в составе КАС будут иметь вид, представленный в табл. 3.6–3.9.

Таблица 3.6 – Таблица маршрутизации коммутатора в составе КАС 1

ИНС	Основные пути		Резервный путь	
	Состав пути	Метрика пути	Состав пути	Метрика пути
ЦССС 1 – ЦССС 3	КАС 1 – КАС 2	5	–	–
ЦССС 3 – ЦССС 1	КАС 2 – ЦССС 1	3	–	–

Таблица 3.7 – Таблица маршрутизации коммутатора в составе КАС 2

ИНС	Основные пути		Резервный путь	
	Состав пути	Метрика пути	Состав пути	Метрика пути
ЦССС 1 – ЦССС 3	КАС 2 – КАС 3	5	–	–
ЦССС 3 – ЦССС 1	КАС 2 – ЦССС 1	2	КАС 2 – КАС 1	5

Таблица 3.8 – Таблица маршрутизации коммутатора в составе КАС 3

ИНС	Основные пути		Резервный путь	
	Состав пути	Метрика пути	Состав пути	Метрика пути
ЦССС 1 – ЦССС 3	КАС 3 – ЦССС 3	2	КАС 3 – КАС 4	5
ЦССС 3 – ЦССС 1	КАС 3 – ЦССС 1	2	КАС 3 – КАС 2	5

Таблица 3.9 – Таблица маршрутизации коммутатора в составе КАС 4

ИНС	Основные пути		Резервный путь	
	Состав пути	Метрика пути	Состав пути	Метрика пути
ЦССС 1 – ЦССС 3	КАС 4 – ЦССС 3	3	–	–
ЦССС 3 – ЦССС 1	КАС 4 – КАС 3	5	–	–

При подавлении КС, входящего в кратчайший путь, например КС КАС 3 – ЦССС 3 при передаче от ЦССС 1 к ЦССС 3, одновременно с уведомлением ЦССС 1 о факте подавления осуществляется переключение на резервный путь КАС 3 – КАС 4. Таким образом, сокращается время реконфигурации, что позволяет повысить показатель устойчивости НКСС, и как следствие – вероятность своевременной доставки пакета $P_{сд}$.

Выводы по третьему разделу:

1. Анализ результатов моделирования функционирования ATM-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП позволяет сделать следующие качественные выводы:

– изменение ОСШП напрямую влияет на изменение параметров сетевого уровня – метрик КС и метрик VPC;

– отказы отдельных КС и VPC, характеризующиеся средним временем между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$ и VPC $T_{\text{отк VPC}}$ соответственно, приводят к отказу соединения ATM, при этом суммарный поток отказов характеризуется плотностью вероятности распределения времени между отказами соединения ATM $f^*(T_{\text{отк ATM}})$, которая может быть аппроксимирована экспоненциальной зависимостью;

– при рассмотрении наихудшей помехи в качестве воздействия средств РЭП, наибольшее влияние на количественные параметры суммарного потока отказов соединения ATM будут оказывать отказы КС.

2. Анализ результатов моделирования функционирования межзвонного соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП позволяет сделать следующие качественные выводы:

– при отношении времени диагностики отказа ИНС к среднему времени между отказами КС $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}} = 1/4$ значение коэффициента готовности ИНС K_{Γ} принимает критическое значение 0,9. При увеличении отношения $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ происходит снижение коэффициента готовности ИНС K_{Γ} ниже 0,9, что является неприемлемым;

– отношение время ожидания восстановления связи в ИНС ко времени диагностики отказа ИНС $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}}$ влияет на быстроту схождения вероятностей нахождения системы в различных состояниях к предельным значениям. При $T_{\text{ож}} = 0T_{\text{диагн}}$ значения вероятностей нахождения системы в работоспособном состоянии в состоянии отказа и в состоянии ожидания достигают своего минимального значения, а вероятность нахождения системы в состояниях реконфигурации – максимального. Увеличение этого отношения выше значения $T_{\text{ож}}/T_{\text{диагн}} = 5$ не влияет на значения вероятностей нахождения системы в различных состояниях;

– при увеличении значений времени диагностики отказа ИНС $T_{\text{диагн}}$ вероятность работоспособного состояния снижается и стремится к своему предельному значению 0,5. При этом значения времени восстановления КС $T_{\text{вост КС}}$ определяют наличие и значение минимума функции вероятности работоспособного состояния;

– при уменьшении $T_{\text{диагн}}/T_{\text{отк КС}}$ снижается влияние значение среднего времени восстановления КС $T_{\text{вост КС}}$ на вероятности $P(S_i)$, а при $T_{\text{диагн}} \leq 0,01T_{\text{отк КС}}$ вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии $P(S_0)$ практически от $T_{\text{вост КС}}$ не зависит.

3. Проведен анализ изменения целевых показателей работы в зависимости от значения среднего времени между отказами КС $T_{\text{отк КС}}$. Уменьшение

значения вероятности связности ИНС $P_{св}$ в случае, если не используются разработанные алгоритмы, приводит к снижению вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}$, а в случае, если используются разработанные алгоритмы – к повышению минимального значения времени диагностики отказа ИНС $T_{диагн}$, при котором обеспечивается заданное значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}^{зад}$. Использование разработанных алгоритмов позволяет обеспечить заданное значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{сд}^{зад} = 0,9 \mid T_{дост}^{зад} = 3$ с. при значениях среднего времени между отказами КС $T_{отк КС} > 1,2$ с, при этом эффективность их использования E_y при $T_{отк КС} = 1,2 \dots 600$ с достигает 80 %, что позволяет сделать вывод о достижении цели исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлено решение актуальной задачи разработки научно-методического аппарата маршрутизации информационных потоков в НКСС в условиях радиоэлектронного подавления.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается:

– обоснованным выбором ограничений и допущений при постановке и решении научной задачи;

– непротиворечивостью полученных результатов с результатами исследований других авторов в данной предметной области;

– апробацией основных результатов в печатных трудах, докладах на научно-технических конференциях и семинарах.

В ходе исследований были приняты ряд допущений и ограничений, упрощающих реальный процесс маршрутизации информационных потоков в транспортной наземно-космической сети ОСССН. Раскрытие указанных недостатков позволяет выделить основные направления, требующие дальнейшего исследования.

В п. 2.2 при разработке модели функционирования АТМ-маршрутизатора при изменении метрики каналов связи вследствие воздействия средств РЭП принято допущение о том, что противоборствующая сторона при выборе наихудшей помехи будет ориентироваться на показатель максимальной средней вероятности ошибки на бит, характеризующий каждый из рассматриваемых видов помех. Вместе с тем, в монографии не рассмотрены вопросы одновременного использования различных видов помех. Кроме того, при исследовании функционирования АТМ-маршрутизатора на основе разработанной модели было принято допущение о квазигармоническом законе изменения скорости передачи в КС как результате воздействий средств РЭП. Данное допущение введено с целью получения четкой аппроксимации распределения среднего времени между отказами $T_{\text{отк КС}}$. В случае воздействия произвольных помех распределение среднего времени между отказами $T_{\text{отк КС}}$ в общем случае может иметь произвольное распределение. В дальнейшем при развитии НМА, полученного в работе, планируется рассмотрение различных видов распределений среднего времени между отказами $T_{\text{отк КС}}$ и оценка влияние их вида на показатели устойчивости СВС.

В п. 2.3 при разработке модели функционирования межузлового соединения НКСС в условиях воздействия средств РЭП было принято допущение об ординарности потока отказов КС в межузловом соединении НКСС. В то же время средства РЭП будут оказывать воздействие на множество КС в составе НКСС, поэтому возможна ситуация, когда при нахождении системы в состоянии реконфигурации (рис. 2.16) вследствие подавления первого КС, происходит подавление следующего КС, и в результате система переходит из состояния реконфигурации в состояние отказа минуя работоспособное состо-

яние. Таким образом, направлением дальнейшего усовершенствования разработанной модели является декомпозиция состояний отказа и состояния ожидания на последовательность состояний «Отказ 1-го КС» – «Отказ 2-х КС» – ... – «Отказ всех КС в составе СС» и последовательность состояний «Ожидание восстановления 1-го КС» – «Ожидание восстановления 2-х КС» – ... – «Ожидание восстановления всех КС в составе СС» соответственно. Кроме того, в разработанной модели учитываются только основные временные параметры сигнализации: время диагностики отказа ИНС $T_{\text{диагн}}$ и время ожидания восстановления связи в ИНС $T_{\text{ож}}$. В то же время не рассматривались дополнительные временные параметры, такие как время задержки повторного выполнения алгоритма поиска кратчайших путей, время задержки повторной рассылки сообщений об изменении метрики КС и др. Учет этих временных параметров путем введения в модель дополнительных состояний и пересчет переходных вероятностей также является направлением ее дальнейшего усовершенствования.

В п. 3.2 показано, что сокращение времени восстановления КС $T_{\text{вост КС}}$ для повышения коэффициента готовности ИНС K_G целесообразно лишь при значениях временного интервала диагностики $T_{\text{диагн}} \geq 0,08T_{\text{отк КС}}$. При этом учитывался тот факт, что требуемое значение коэффициента готовности ИНС K_G должно быть меньше, чем заданное значение вероятности своевременной доставки пакета $P_{\text{СД}}^{\text{зад}} = 0,9$. В случае смягчения предъявляемых к СС требований по устойчивости связи необходимо дополнительно учесть влияние значения времени восстановления отдельных КС $T_{\text{вост КС}}$ на значения показателей устойчивости связи.

В п. 3.3. при оценке повышения устойчивости связи при использовании разработанного НМА функционирование протокола маршрутизации PNNI рассматривалось при установке значений временных интервалов сигнализации по умолчанию, то есть при значении времени диагностики отказа ИНС $T_{\text{диагн}} = 15$ с и значении времени ожидания восстановления связи в ИНС $T_{\text{ож}} = 75$ с. В реальности оператор может уменьшить эти значения временных интервалов сигнализации по собственному усмотрению, в том числе ориентируясь на сложные условия функционирования сети. В этом случае необходимо учесть временные затраты на расчет необходимых значений этих интервалов и их коррекцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков, А.Ф. Военные космические программы США – основа сете-центрических войн будущего. А.Ф. Горшков // Вооруженные силы и военно-промышленный потенциал. – 2005. – № 9. – С. 3–17
2. Московитов, Н. Перспективы создания глобальной информационной сети МО США. Н. Московитов, Г. Рыбаков // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – № 7. – С. 8–19
3. Махов, В. Войска – «на цифру»! / В. Махов // Красная звезда. – № 199, ЦО МО России, 2010.
4. От аналога к цифре // Красная звезда: № 182, ЦО МО России, 2010.
5. Строгов, С. Перспективные системы спутниковой связи военного назначения ведущих зарубежных стран / С. Строгов // Зарубежное военное обозрение. – 2009. – № 5. – С. 50–58.
6. Косяков, Е.Н. Сети связи и системы коммутации: учебник / Е.Н. Косяков, А.В. Родионов, К.Ю. Цветков; под общ. ред. Д-ра техн. наук, проф. К.Ю. Цветкова. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. – 329 с.
7. Копылов, В.А. Тактика РТВ ВВС. Современное состояние и перспективы развития СВКН основных зарубежных государств: метод. указания к практическим и групповым занятиям / В.А. Копылов, В.С. Кунчев, Е.В. Сомов, В.М. Бацылев. – Красноярск: СФУ, 2011. – 48 с.
8. Паршин, С. Совершенствование сети «Тактический интернет» Сухопутных войск США / С. Паршин // Зарубежное военное обозрение. – 2008. – № 6. – С. 38–45.
9. Денисов, Б.Б. Проблемы наращивания телекоммуникационного ресурса в интересах функционирования информационно-управляющих систем специального назначения / Б.Б. Денисов // Доклад на научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения-2012». – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2012.
10. Свитов, Р. Состояние и перспективы развития американских военных систем спутниковой связи / Р. Свитов // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – № 12. – С. 63–68.
11. Макаренко, С. И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов / С. И. Макаренко // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 6. Электронный ресурс. Режим доступа: – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf> (дата доступа 20.03.2016).
12. Исследование технических путей построения унифицированных радиосредств цифровой автоматизированной системы авиационной радиосвязи. Промеж. отчет. шифр «Сапсан» / Рук.: А.Д. Виноградов, отв. исп.: М.С. Иванов, исп.: С.А. Попов и др. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2013.
13. Макаренко, С.И. Системы связи: учеб. пособие для студ. (курсантов) вузов / С.И. Макаренко, В.И. Сапожников, Г.И. Захаренко, В.Е. Федосеев; под общ. ред. С.И. Макаренко. – Воронеж: изд. ВАИУ, 2011. – 285 с.

14. Куприянов, А.И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2003. – 528 с.
15. Кузенков, А.В. Состояние и перспективы развития отечественных ретрансляторов / А.В. Кузенков // Аэрокосмический курьер. – 2013. – № 2. – С. 42–45.
16. Кульгин, М.А. Технологии корпоративных сетей. Энциклопедия / М.А. Кульгин. – СПб.: «Питер», 1999. – 704 с.
17. Лялюк, И.Н. С4I: Системы связи, АСУ и разведки Вооруженных сил США: учеб. пособие / И.Н. Лялюк. – М.: Военный авиационный технический университет, 2000.
18. Горбачёв, Ю. Взгляды командования Сухопутных войск США на сущность и содержание радиоэлектронной войны / Ю. Горбачёв // Зарубежное военное обозрение. – 2011. – № 9. – С. 34–41.
19. Русаков, В. Взгляды Командования сухопутных войск США на содержание информационно-разведывательной деятельности войск (сил) в современных операциях / В. Русаков, С. Вахрамов // Зарубежное военное обозрение. – 2012. – № 12. – С. 39–46.
20. Содержание и роль радиоэлектронной борьбы в операциях XXI века / И. Иванов И., Чадов // Зарубежное военное обозрение. – 2011. – № 1 – С. 14–20.
21. Радиоэлектронная разведка / В.А. Вартанесян. – М.: Воениздат, 1975. – 255 с.
22. Радиоэлектронная борьба. 2-е изд. / А.И. Палий. – М.: Военное издательство, 1989. – 350 с.
23. Афинов, В. Состояние и перспективы развития средств РЭБ армии США / В. Афинов // Зарубежное военное обозрение. – 1989. – № 5. С. 27–29. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – URL: http://pentagonus.ru/publ/sostojanie_i_perspektivu_razvitija_sredstv_rehb_armii_ssha_ch1/80-1-0-1293 (дата доступа 10.03.2013).
24. Перунов, Ю.М. Зарубежные радиоэлектронные средства системы радиоэлектронной борьбы / Ю.М. Перунов, В.В. Мацукевич, А.А. Васильев. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2010.
25. Майбуров, Д.Г. Анализ современных воздушных платформ радиоэлектронной борьбы иностранных государств / Д.Г. Майбуров // Проблемы безопасности российского общества. – 2013. – № 2/3. – С. 91–97.
26. Евграфов, В. Перспективы использования зарубежными вооруженными силами беспилотных летательных аппаратов для решения задач РЭБ / В. Евграфов // Зарубежное военное обозрение. – 2009. – № 10. – С. 53–59. – URL: http://pentagonus.ru/publ/perspektivu_ispolzovaniya_zarubezhnymi_vooruzhjonnyimi_silami_bespilotnykh_letatelnykh_apparatov_dlja_reshenija_zadach_rehb/24-1-0-1407.
27. Жигадло, В. Телекоммуникационные сети военного назначения США и стран НАТО. Особенности и тенденции развития / В. Жигадло // Электроника НТБ. Вып. № 4–5, 1999.

28. Орбитальная группировка ВС США Воздушно-космическая оборона. 2004. – № 5.
29. Михайлов, Р.Л. Основные пути развития объединенной автоматизированной цифровой системы связи Вооруженных сил Российской Федерации и требования к качеству обслуживания абонентов / Р.Л. Михайлов, С.И. Макаренко. – М., 2012. – 98 с. – Деп. в 46 ЦНИИ МО РФ 07.05.13, № 23666.
30. Новиков, С.Н., Буров, А.А. Анализ методов маршрутизации в широкополосных цифровых сетях интегрального обслуживания (Ш-ЦСИО) / С.Н. Новиков, А.А. Буров. – М.: ВНИИЦ, 2004. – № 50200401220.
31. Надежность и живучесть систем связи / Под ред. Дудника Б.Я. – М.: Радио и связь, 1984.
32. Нетес, В.А. Надежность сетей связи в период перехода к NGN // Вестник связи. – 2007. – № 9. – С. 1–8.
33. Киселев, Л.К. Концептуальные основы обеспечения устойчивости сетей связи / Л.К. Киселев, А.П. Маркелов, Б.В. Воробьев // Электросвязь, 1994. – № 2.
34. Юрасова, Л.В. Проблемы разработки нормативных правовых актов по вопросам применения средств связи / Л.В. Юрасова, С.Ф. Кондратов // Электросвязь. – 2007. – № 3.
35. ГОСТ 5311–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования.
36. Михайлов, Р.Л. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на нее дестабилизирующих факторов / Р.Л. Михайлов, С.И. Макаренко // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 4. – С. 69–79.
37. ГОСТ РВ 52216–2004. Связь военная. Термины и определения.
38. Боговик, А.В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки / А.В. Боговик, В.В. Игнатов. – СПб.: ВАС, 2006. – 183 с.
39. ГОСТ РВ 0158-002-2008. Борьба радиоэлектронная. Термины и определения.
40. Бабусенко, С.И. Особенности построения информационно-вычислительных сетей / С.И. Бабусенко // Повышение познавательной деятельности курсантов на различных видах занятий по военно-специальным дисциплинам. – Воронеж: ВВВИУРЭ, 1990.
41. Буров, А. А. Исследование влияния методов маршрутизации на качество обслуживания в мультисервисных сетях связи, функционирующих в экстремальных условиях: дисс. канд. техн. наук 05.12.13 / А. А. Буров. – Новосибирск: СибГУТИ, 2009.
42. Chao, H.J. Quality of service control in high-speed networks / H.J. Chao, Guo Xiaolei – Wiley-IEEE, 2002. – 432 p.
43. Peng, B. QoS routing with bandwidth and hop-count consideration – a performance perspective / B. Peng, A.H. Kemp, S. Boussakta // Journal of Communications. – 2006. – № 1 (2). – P. 1–11.

44. Deepankar, M. Network routing: algorithms, protocols, and architectures / M. Deepankar, R. Karthikeyan. – Morgan Kaufmann Publishers, 2007. – 788 p.
45. Pióro, M. Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks / M. Pióro, D. Medhi. – Morgan Kaufmann Publishers, 2004. – 765 p.
46. Руденко, И.Т. Маршрутизаторы CISCO для IP-сетей / И.Т. Руденко. – М.: Кудиц-Образ, 2003. – 656 с.
47. Димарцио, Д.Ф. Маршрутизаторы Cisco. Пособие для самостоятельного изучения / Д.Ф. Димарцио. – СПб.: Символ-Плюс, 2003. – 512 с.
48. Остерлох, Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка / Х. Остерлох. – СПб.: BHV-СПб., 2002. – 512 с.
49. Руководство по технологиям объединенных сетей / пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2005. – 1040 с.
50. Doyle, J. CCIE Professional Development Routing TCP/IP / J. Doyle, J. Carroll. – Cisco Press, 2005. – 936 p.
51. Jiayue, He. Toward internet-wide multipath routing / He. Jiayue, J. Rexford // IEEE Network. – 2008. – Vol. 22. – Issue 2. – P. 16–21.
52. Mantar, H.A. A scalable intra-domain resource management architecture for DiffServ networks / H.A. Mantar, I.T. Okumus, J. Hwang // Journal of High Speed Networks. – 2006. – Vol. 15. – P. 185–205.
53. Mantar, H. A Scalable And Efficient Inter-Domain QoS Routing Architecture For Diffserv Networks / H.A. Mantar, J. Hwang, S.J. Chapin // IFIP/IEEE Eighth International Symposium on Inte-grated Network Management, 2003: proceedings of the symposium. – P. 463–467.
54. Orda, A. Precomputation schemes for QoS routing / A. Orda, A. Sprintson // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2003. – Vol. 11. – Issue 4. – P. 578–591.
55. Cui, Y. Precomputation for multi-constrained QoS routing in high-speed networks / Y Cui, K. Xu, J. Wu // IEEE INFOCOM 2003: Proceedings of the conference, Vol. 1. – P. 1305–1315.
56. Orda, A. QoS Routing: The Precomputation Perspective / A. Orda, A. Sprintson // IEEE INFOCOM 2000: Proceedings of the conference, Vol. 3. – P. 283–291.
57. Pelsser, C. Path Selection Techniques to Establish Constrained Inter-domain MPLS LSPs / C. Pelsser, O. Bonaventure // 5th International IFIP-TC6 Networking Conference, 2006: Proceedings of the conference. – P. 209–220.
58. Sprintson, A. Reliable Routing with QoS Guarantees for Multi-Domain IP/MPLS Networks / A. Sprintson, M. Yannuzzi, A. Orda // IEEE INFOCOM, 2007: Proceedings of the conference. – P. 1820–1828.
59. Dasgupta, S. Path-Computation-Element- Based Architecture for Inter-domain MPLS/GMPLS Traffic Engineering: Overview and Performance / S. Dasgupta, J.C. de Oliveira, J.-P. Vasseur // IEEE Network. – 2007. – Vol. 21. – Issue 4. – P. 38–45.

60. Morand, P. Final specification of protocols and algorithms for inter-domain SLS management and traffic engineering for QoS-based IP service delivery. Report IST-2001-37961 D1.3 / P. Morand, M. Bou-cadair, T. Coadic. – MESCAL Consortium, 2001. – 215 p.
61. Trimintzios, P. A management and control architecture for providing IP differentiated services in MPLS-based networks / P. Trimintzios, I. Andrikopoulos, G. Pavlou // IEEE Communications Magazine. – 2001. – Vol. 39. – Issue 5. – P. 80–88.
62. Shaleeza, S. The survey of bandwidth broker. Technical reports UNSW-CSE-0206 / S. Shaleeza, J. Sanjay. – University of New South Wales, School of Computer Science and Engineering, 2002. – 356 p.
63. Mantar, H.A. A scalable model for interbandwidth broker resource reservation and provisioning / H.A. Mantar, J. Hwang, I.T. Okumus] // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2004. – Vol. 22. – Issue 10. – P. 2019–2034.
64. Aukia, P. RATES: a server for MPLS traffic engineering / P. Aukia, M. Kodialam, P.V.N. Koppol // IEEE Network. – 2000. – Vol. 14. – Issue 2. – P. 34–41.
65. Caesar, M. Design and implementation of a Routing Control Platform / M. Caesar, D. Caldwell, N. Feamster // Networked Systems Design and Implementation (NSDI), 2005: Proceedings of the conference. – P. 54–67.
66. Дикер Пилдуш, Г. Сети ATM корпорации Cisco / Г. Дикер Пилдуш. – М.: Издательство «Вильямс», 2004. – 880 с.
67. Xiao, L. QoS Extension to BGP / L. Xiao, K.-S. Lui, J. Wang // 10th IEEE International Conference on Network Protocols, 2002: Proceedings of the conference. – P. 100–109.
68. Okumus, I.T. Inter-Domain QoS Routing on Diffserv Networks: A Region Based Approach / I.T. Okumus, H.A. Mantar, J. Hwang // Journal of Computer Communication. – 2005. – Vol. 28. – P. 174–188.
69. Key, P. Combined Multipath Routing and Congestion Control: a Robust Internet Architecture / P. Key, L. Massoulie, D. Towsley // TechReport MSR-TR. – Microsoft Research, 2005. – 361 p.
70. Key, P. Path Selection and Multipath Congestion Control / P. Key, L. Massoulie, D. Towsley // IEEE INFOCOM 2007: International Conference on Computer Communications, 2007: Proceedings of the conference. – P. 143–151.
71. Назаров, А. Н. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения / А.Н. Назаров, К.И. Сычев. – Красноярск: Поликом, 2010. – 389 с.
72. Ададунов, С.Е. Показатели устойчивости информационного обмена в защищенных телекоммуникационных системах / С.Е. Ададунов, С.К. Чатоян, А.Е. Зелинский // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. МОПО РФ, СПбГТУ, Специализированный центр защиты информации – 1999. – № 2. – С. 100–107.

73. Ушаков, И.А. Курс теории надежности систем: учеб. пособие для вузов / И.А. Ушаков. – М.: Дрофа. – 2008. – 239 с.
74. Макаренко, С.И. Анализ воздействия преднамеренных помех на функционирование расширенного протокола маршрутизации внутреннего шлюза (EIGRP) / С.И. Макаренко // Информационные технологии моделирования и управления. – 2010. – № 2 (61). – С. 223–229.
75. Фокин, В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети: учеб. пособие / В.Г. Фокин. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 271 с.
76. Private Network-Network Interface Specification Version 1.1 (PNNI 1.1) – ATM Forum – AF-PNNI-0055.001, 2001. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.atmforum.com/contactfs1.html>.
77. Новиков, С.Н. Методы маршрутизации в цифровых широкополосных сетях связи: учеб. пособие. Ч. 1. / С.Н. Новиков. – Новосибирск: СибГУТИ, 2000. – 84 с.
78. Свами, М. Графы, сети и алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман. – М.: Мир, 1984. – 454 с.
79. Будылдина, Н.В. Разработка и исследование алгоритмов оптимизации сетей с многопротокольной коммутацией по меткам: дисс. ... канд. техн. наук: 05.12.13 / Н. В. Будылдина. – Новосибирск, 2006. – 124 с.
80. Гахов, Р.П. Разработка метода повышения непрерывности функционирования сетей передачи данных / Р.П. Гахов, И.В. Косенко // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – № 3. – Т. 5. – С. 81–83.
81. Гахов, В.Р. Разработка математической модели маршрутизатора / В.Р. Гахов, Р.П. Гахов, И.В. Косенко // Инфокоммуникационные технологии. – 2007. – № 3. – Т. 5. – С. 52–55.
82. Красильникова, О.С. Методы оптимизации времени сходимости открытых протоколов маршрутизации / О.С. Красильникова // Известия института инженерной физики. – 2011. – № 11. – Т. 4. – С. 21–24.
83. Lichtwald G. Improving Convergence Time of Routing Protocols. / G. Lichtwald, U. Walter, M. Zitterbart. [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – URL: <http://telematics.tm.kit.edu/publications/Files/9/lichtwald-routing-convergence-icn2004.pdf> (дата доступа: 15.06.2014).
84. Макеев С.А. Оптимизация конфигурируемых параметров маршрутизатора / С.А. Макеев, Т.И. Алиев // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). Выпуск 10. Информация и управление в технических системах. – СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – С. 91–94.
85. Михайлов, Р.Л. Модель функционирования маршрутизатора в сети в условиях ограниченной надежности каналов связи / Р.Л. Михайлов, С.И. Макаренко // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – № 2. – Т. 12. – С. 44–49.
86. Хант, Г. Реализация систем для ведения «сетевых» (net-centric) войн / Г. Хант // МКА: Мир ВКТ. – 2007. – № 7. – С. 64–70.
87. Макаренко, С.И. Анализ воздействия преднамеренных помех на сетевой уровень модели взаимодействия открытых систем и функционирование

протокола маршрутизации оценки состояния канала (OSPF) / С.И. Макаренко // Информационные технологии моделирования и управления. – 2009. – № 7 (59). – С. 956–961. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: www.sbook.ru/itmu/itmu.htm.

88. Борисов, В.И. Пространственные и вероятностно-временные характеристики эффективности станций ответных помех при подавлении систем радиосвязи / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, А.В. Немчилов, А.А. Чаплыгин. – Воронеж: ОАО «Концерн «Созвездие»», 2007. – 354 с.

89. Макаренко, С.И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.

90. Сикорский, А.Б. Методы повышения помехоустойчивости систем подвижной сотовой связи в условиях преднамеренных помех / А.Б. Сикорский // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. изд. СПбГПУ. – 2001. – № 3. – С. 54–67.

91. Тузов, Г. И. Помехозащищенность каналов связи с ППРЧ и кодированием в условиях помех в части полосы / Г.И. Тузов, М.Р. Козлов // Техника средств связи. Серия Техника радиосвязи. – 1990. – Вып. 1. – С. 18–24.

92. Иванов, М.С. Помехозащищенность широкополосных систем радиосвязи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / М.С. Иванов, С.А. Попов // Сборник докладов XI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного применения». – Ярославль: ЯВВЗРУ, 2011. – С. 322–329.

93. Варакин, Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Радиоисвязь, 1985. – 436 с.

94. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / под ред. В.Г. Радзивского. – М.: Радиотехника», 2006. – 424 с.

95. Torrieri, D.J. Principles of Secure Communication Systems. Dedham / D.J. Torrieri. – MA.: Artech House Inc., 1985. – 302 p.

96. Levitt, B.K. Use of Diversity to Improve FH/MFSK Performance in Worst Case Partial Band Noise and Multitone Jamming / B.K. Levitt // IEEE Milcom'82, Conf. Boston. – 1982. – P. 111–120.

97. Макаренко, С.И. Модели воздействия средств радиоэлектронной борьбы на систему связи на основе методов популяционной динамики / С.И. Макаренко // Вестник ВГТУ. – 2011. – № 1. – Т. 7. – С. 96–99.

98. Макаренко, С.И. Оценка качества обслуживания пакетной радиосети в нестационарном режиме в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов / С.И. Макаренко // Журнал радиоэлектроники. – 2012. – № 6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: jre.cplire.ru/jre/jun12/9/text.pdf

99. Макаренко, С.И. Исследование влияния преднамеренных помех на возможности по ретрансляции сообщения и показатели качества обслуживания канального уровня модели OSI для системы связи со случайным множественным доступом абонентов / С.И. Макаренко // Информационные техно-

логии моделирования и управления. – 2010. – № 6 (65). – С. 807–815. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: www.sbook.ru/itmu/itmu.htm

100. Макаренко, С.И. Подавление пакетных радиосетей со случайным множественным доступом за счет дестабилизации их состояния / С.И. Макаренко // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – № 9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: jre.cplire.ru/jre/sep11/4/text.pdf

101. Камнев, В.Е. Спутниковые сети связи: учеб. пособие / В.Е. Камнев, В.В. Черкасов, Г.В. Чечин. – М.: «Альпина Паблишер», 2004. – 536 с.

102. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation system for Broadcasting Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications.

103. ETSI EN 300 421. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services.

104. ETSI EN 301 210. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite.

105. ETSI TR 102 376 v. 1.1.1 (2005-02). Digital Video Broadcasting (DVB); User guidelines for the second generation system for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2).

106. ETSI EN 300 744. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television.

107. Стандарт DVB-S2. Система цифрового ТВ вещания // Контур-М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: www.konturm.ru/tech.php?id=dvbs2

108. Программа сетевой академии Cisco. CCNA 1 и 2. – М.: «Вильямс», 2008. – 1168 с.

109. Олифер, В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учеб. для вузов. 4-е изд. / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2012. – 944 с.

110. Владимиров, В.И. Информационные основы радиоподавления линий радиосвязи в динамике информационного конфликта / В.И. Владимиров. – Воронеж: ВАИУ, 2003. – 139 с.

111. Красносельский, И.Н. Исследование помехоустойчивости системы DVB-T на модели канала с многолучевым распространением / И.Н. Красносельский, С.А. Канев // Электросвязь. – 2010. – № 7. – С. 28–30.

112. Худяков, Г.И. Пропускная способность цифровых каналов электросвязи с квадратурной амплитудной модуляцией / Г.И. Худяков // Электросвязь. – 2010. – № 6. – С. 38–40.

113. Анпилогов, В.Р. Конвергенция и дивергенция технологий и сервисов в сетях VSAT KU- и КА-диапазонов / В.Р. Анпилогов, П.М. Тырин, В.И. Шубин, А.Г. Эйдус // Электросвязь. – 2012. – № 6. – С. 27–31.

114. Арсеньев, А.В. Динамика изменения показателей качества каналов беспроводного доступа с многолучевыми замираниями при пакетной коммутации / А.В. Арсеньев // Электрические и информационные комплексы и системы. – 2009. – № 1. – Т. 5. – С. 53–57.

115. Габриэльян, Д.Д. Особенности обработки широкополосных сигналов при воздействии преднамеренных помех, соизмеримых с полезным сигналом по полосе частот / Д.Д. Габриэльян, А.Н. Новиков, А.В. Стрекалов, В.В. Шацкий, Н.В. Шацкий // Инфокоммуникационные технологии. – 2011. – № 3. – Т. 9. – С. 94–99.

116. Осипов, Д.С. Система множественного доступа, использующая некогерентный пороговый прием, частотно-позиционное кодирование и динамически выделяемый диапазон частот, в условиях подавления полезного сигнала / Д.С. Осипов // Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 6. – С. 28–32.

117. Эльснер, Й. О пропускной способности беспроводных многоканальных одноранговых сетей с местным планированием частотного разделения каналов / Й. Эльснер, Р. Танбурги, Ф. Йондраль // Информационно-управляющие системы. – 2010. – № 6. – С. 70–76.

118. Кихтенко, А.В. Вывод расчетных соотношений для времени обслуживания и эффективной пропускной способности спутникового и радио каналов связи / А.В. Кихтенко, С.И. Макаренко. – Ставрополь: СВВАИУ(ВИ), 2006. – 24 с. Деп. в СИФ ЦВНИ Минобороны РФ 14.05.2007, № 15246.

119. Егунов, М.М. Анализ структурной надежности транспортной сети / М.М. Егунов, В.П. Шувалов // Вестник СибГУТИ. – 2012. – № 1. – С. 54–60.

120. Телегин, Г.А. Спутниковые интегрированные телекоммуникационные сети на технологии ATM / Г.А. Телегин, Н.И. Моисеев, А.С. Демидов, О.Д. Рязанцев, В.Г. Алыбин // 11th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2001). – 2001. – С. 2–17.

121. Макаренко, С.И. Техничко-экономический анализ внедрения новых объектов в существующие информационные системы / С.И. Макаренко // Сб. по мат. докладов Всероссийской научно-технической школы-семинара «Передача, обработка и отображение информации». – Ставрополь: Изд. СВВАИУ (ВИ), 2008. – С. 63–66.

122. Панфлов, И. В. Вычислительные системы / И.В. Панфлов, А.М. Половко; под ред. А.М. Половко. – М.: Сов. радио, 1980.

123. Основы надежности и технического обеспечения радиоэлектронных средств РТВ ПВО: учебник / под ред. Б.П. Креденцера, В.Г. Тоценко. – Киев: Изд КВИРТУ ПВО, 1982. – 225 с.

124. Михайлов, Р.Л. Исследование канальных и сетевых параметров канала связи в условиях динамически изменяющейся сигнально-помеховой обстановки / С.И. Макаренко, Е.А. Новиков, Р.Л. Михайлов // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct14/3/text.pdf>.

125. Михайлов, Р.Л. Модель функционирования объекта сети связи в условиях ограниченной надежности каналов связи / С.И. Макаренко, Р.Л. Михайлов, К.Ю. Рюмшин // Информационные системы и технологии. – 2014. – № 6 (86). – С. 139–147.

126. Михайлов, Р.Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры с целью повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей / К.Ю. Цветков, С.И. Макаренко, Р.Л. Михайлов // Информационно-управляющие системы. – 2014. – № 2. – С. 71–78.

127. Михайлов, Р.Л. Обеспечение динамической совместимости управляемой и управляющей подсистем военной системы спутниковой связи на основе системного подхода / Е.А. Новиков, Н.В. Селезнев, Р.Л. Михайлов // Сб. научн. тр. в/ч 32103. – Краснознаменск: Главный испытательный космический центр МО РФ имени Г.С. Титова. – 2012. – № 30. – С. 53–60.

128. Михайлов, Р.Л. Предложения по модификации алгоритма Дейкстры для повышения устойчивости протоколов маршрутизации с использованием топологической избыточности сетей единой спутниковой системы связи 3-го поколения / Р.Л. Михайлов, С.И. Макаренко // Сб. алгоритмов и прикладных задач. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского. – 2013. – Вып. 30. – С. 135–143.

129. Михайлов, Р.Л. Анализ протоколов маршрутизации, используемых в перспективных сетях связи военного назначения, в интересах формирования предложений по повышению их устойчивости / Р.Л. Михайлов // Сб. докладов Межведомственной научно-практической конференции «Радиоэлектронная борьба в XXI веке: способы, средства, направления развития». Воронеж: Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. – 2012. – С. 43–45.

130. Михайлов, Р.Л. Анализ направлений развития сетей связи специального назначения / Р.Л. Михайлов // Сб. тр. 32 межвузовского научно-технического семинара «Основные пути развития радиоэлектронного вооружения». СПб.: Михайловская военная артиллерийская академия. – 2013. – Ч. 1. – С. 130–133.

131. Михайлов, Р.Л. Особенности маршрутизации в системах связи специального назначения при воздействии перспективных средств подавления противника / Р.Л. Михайлов, К.Ю. Цветков, С.И. Макаренко // Мат. и доклады VIII Всероссийской межведомственной научной конференций «Актуальные проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения». – Орел: Академия Федеральной службы охраны России, 2013. – Ч. 7. – С. 54–57.

132. Михайлов, Р.Л. Моделирование функционирования сетевых протоколов с использованием резервирования маршрутов / Р.Л. Михайлов // Мат. Всероссийской научной конференции «Современные тенденции развития теории и практики управления в системах специального назначения». – М.: ОАО «Концерн «Системпром», 2013. – Т. IV. – С. 35–38.

133. Михайлов, Р.Л. Совершенствование протоколов маршрутизации в целях обеспечения информационной безопасности / Р.Л. Михайлов // Сб. докладов II Межвузовской научно-практической конференции «Актуальные проблемы организации и технологии защиты информации». – СПб.: НИУ ИТМО. – 2012. – С. 61–63.

134. Михайлов, Р.Л. Протоколы маршрутизации в системах спутниковой связи с обработкой сигналов на борту и направления их модификации / Р.Л. Михайлов // Труды VI Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос». – СПб.: Балтийский государственный университет, 2014. – С. 204–206.

135. Михайлов, Р.Л. Метод маршрутизации в наземно-космических сетях связи в условиях радиоэлектронного противоборства / Сборник «Проблемы теории и практики развития войск ПВО СВ в современных условиях: Мат. XXII военно-научной конференции». – Смоленск: Военная академия Войск противовоздушной обороны ВС РФ, 2014. – Ч. 4. – С. 101–104.

136. Михайлов, Р.Л. Анализ возможности подавления протоколов маршрутизации в перспективной структуре воздушного эшелона объединенной автоматизированной цифровой системы связи ВС РФ / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, Р.Л. Михайлов // Научные чтения имени Александра Степановича Попова: сб. ст. по мат. докладов региональной НПК курсантов, студентов, молодых ученых, посвященной Дню образования войск связи (16 октября 2012 года). – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2012. – Вып. 1. – С. 127–129.

137. Михайлов, Р.Л. Особенности маршрутизации при воздействии факторов дестабилизации информационных потоков / С.И. Макаренко, Р.Л. Михайлов // Мат. юбилейной XII Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика (РИ-2012)», 24–26 октября 2012 г. – СПб.: СПОИСУ, 2012. – С. 158.

138. Михайлов, Р.Л. Маршрутизация в системах связи при работе в условиях воздействия факторов дестабилизации информационных потоков / С.И. Макаренко, К.Ю. Цветков, Р.Л. Михайлов // Доклады VI Всероссийской НТК «Радиолокация и радиосвязь» (19–22 ноября 2012 г.) Т. 2. – М.: Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 2012. – С. 304.

139. Михайлов, Р.Л. Особенности маршрутизации в системах связи специального назначения при воздействии перспективных средств подавления противника / С.И. Макаренко, К.Ю. Цветков, Р.Л. Михайлов // Актуальные проблемы развития технологических систем государственной охраны, специальной связи и специального информационного обеспечения: VIII Всероссийская межведомственная научная конференция : Мат. и доклады (Орел, 13–14 февраля 2013 г.). В 10 ч. – Ч. 7 / под общ. ред. В.В. Мизерова. – Орел: Академия ФСО России, 2013. – С. 54–57.

140. Михайлов, Р.Л. Адаптация параметров сигнализации в протоколе маршрутизации с установлением соединений при воздействии на сеть дестабилизирующих факторов / С.И. Макаренко, Р.Л. Михайлов // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 1. – С. 98–126. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://journals.intelgr.com/sccs/archive/2015-01/07-Makarenko.pdf>.

141. Михайлов, Р.Л. Модели и алгоритмы маршрутизации в транспортной наземно-космической сети связи военного назначения / Р.Л. Михайлов // Системы управления, связи и безопасности. – 2015. – № 3. – С. 52–82.

Михайлов Роман Леонидович

Помехозащищенность транспортных сетей связи
специального назначения

Монография

Ответственный за выпуск Михайлов Р.Л., редактор Мурашова О.В., корректор
Гордиенко В.В.

Подписано к печати 02.06.2016 г. Формат бум. 60 × 84/8. Усл. печ. л. 14,88.
Зак. 103. Тираж 20 экз. РИО ЧВВИУРЭ.
